

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL  
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL  
DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FABIÁN YESID BARAJAS PEÑARANDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL  
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL  
DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FABIÁN YESID BARAJAS PEÑARANDA**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director**

**OMAR A. GÉLVEZ AROCHA**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **DEDICATORIA**

EL HONOR Y LA GLORIA AL PADRE CREADOR

EL HONOR Y LA GLORIA AL HIJO SALVADOR, JESÚS DE NAZARET

EL HONOR Y LA GLORIA A LA UNIÓN DEL PADRE Y DEL HIJO, EL ESPÍRITU SANTO, QUE ME HAN BENDECIDO CON UNA GRAN FAMILIA, ME HAN DADO A MI SEÑORA MADRE, A MI SEÑOR PADRE, A MIS HERMANAS Y A MI HERMANO.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos los compañeros que me ayudaron a registrar los datos en la fase de pruebas, Fabián Puerto, auxiliares del Laboratorio de Transferencia de Calor.

A Gonzalo Calderón que me colaboro mucho en la solución de algunos problemas.

A Fredy que me acompañó y colaboró.

Al Ingeniero Omar Armando Gélvez, director de proyecto de grado, por su colaboración y asesoría.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO CONCEPTUAL.	21
1.1. BIOMASA.	21
1.1.1. Fuentes de generación de biomasa residual.	23
1.1.1.1. Biomasa residual del sector agrícola.	24
1.1.1.1.1. Residuos forestales.	24
1.1.1.1.2. Cultivos energéticos.	24
1.1.1.2. Biomasa residual del sector pecuario.	25
1.1.1.3. Biomasa residual del sector residuos urbanos.	25
1.1.2. Ventajas del uso de la biomasa.	26
1.1.3. Inconvenientes del uso de la biomasa.	27
1.1.3.1. Recolección, transporte y utilización de la biomasa.	27
1.1.3.2. Adecuación de la materia prima.	27
1.1.3.2.1. Etapa de trituración.	28
1.1.3.2.2. Etapa de secado.	31
1.2. PROCESOS APLICADOS PARA LA CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA.	32
1.2.1. Procesos bioquímicos.	33
1.2.1.1. Tipos de procesos bioquímicos.	33
1.2.2. Procesos termoquímicos.	34
1.2.2.1. Tipos de procesos termoquímicos.	34
2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.	37

2.1. VARIABLES FÍSICAS MEDIDAS EN EL RESIDUO FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.	37
2.1.1. Densidad aparente.	37
2.1.2. Humedad.	38
2.2. VARIABLES QUÍMICAS MEDIDAS EN EL RESIDUO FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.	38
2.2.1. Análisis próximo.	39
2.2.1.1. Cenizas (Cz).	39
2.2.1.2. Material Volátil (MV).	39
2.2.1.3. Carbono Fijo (CF).	40
2.3. CONTENIDO ENERGÉTICO DEL RESIDUO FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.	40
3. DISEÑO DEL GASIFICADOR.	42
3.1. TEORÍA DE LA GASIFICACIÓN.	44
3.1.1. Zonas generadas en el proceso de gasificación.	45
3.1.2. Reacciones químicas de la gasificación de la biomasa.	46
3.1.2.1. Reacción estequiométrica para la fórmula empírica que define a la madera.	47
3.1.2.2. Relación aire /combustible para la combustión de la madera.	48
3.1.3. Rangos en volumen de los componentes presentes en una corriente de gas pobre.	48
3.1.4. Eficiencia del gasificador.	49
3.2 TIPOS DE GASIFICADORES.	51
3.2.1. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo (Updraft).	51
3.2.2. Gasificador de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft).	53

3.2.3. Gasificador de tiro transversal.	56
3.2.4. Gasificador de lecho fluidizado.	57
3.3. FORMA GENERAL DEL DISEÑO A CONSTRUIR.	58
3.4. CALCULO DEL CAUDAL DE GAS POBRE QUE REQUIERE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA QUE PUEDA FUNCIONAR.	59
3.4.1. Características del motor de combustión interna.	59
3.4.2. Calculo del máximo caudal de mezcla (aire / gas pobre) a ser consumido por el motor.	62
3.4.3. Coeficiente estequiométrico (aire/gas pobre) para un exceso del 10% de aire en la mezcla para la determinación del máximo caudal de gas pobre a producir para alimentar al motor.	63
3.4.4. Eficiencia volumétrica para determinar el caudal real de gas pobre a ser consumido por el motor.	64
3.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA TÉRMICA DE LA CORRIENTE HALLADA DE GAS POBRE.	65
3.6. EFICIENCIA MECÁNICA DEL MOTOR PARA EL CÁLCULO DE LA MÁXIMA POTENCIA MECÁNICA EN EL EJE.	65
3.7. CÁLCULO DE LA MÁXIMA POTENCIA ELECTRICA A GENERAR	65
3.8. DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE CORRIENTE DESCENDENTE O TIRO INVERTIDO.	66
3.8.1. Eficiencia térmica del gasificador.	66
3.8.2. Carga del hogar.	67
3.8.3. Principales dimensiones de los gasificadores de tipo normal (Imbert) para astillas de madera.	69
3.8.4. Altura del plano de los inyectores sobre la garganta, hnt, en función del diámetro de la garganta (dt).	72

3.8.5. Diámetro del hogar, $d_r$ , en función del diámetro de garganta ( $d_t$ ).	73
3.8.6. Diámetro del anillo de las puntas de las toberas, $d_{nt}$ , en función del diámetro de garganta, $d_t$ .	74
3.8.7. Relación entre la superficie de salida de la tobera, $A_n$ , y la superficie de la garganta, $A_t$ , en función del diámetro de garganta.	77
3.9. FORMA DEFINIDA DEL DISEÑO A CONSTRUIR.	79
3.9.1. Altura del plano de los inyectores sobre la garganta, $h_{nt}$ , en función del diámetro de garganta ( $d_t$ ).	79
3.9.2. Diámetro y ángulo de la cámara de combustión.	80
3.9.3. Diámetro del anillo de las puntas de las toberas, $d_{nt}$ , en función del diámetro de garganta, $d_t$ .	81
3.9.4. Relación entre la superficie de salida de la tobera, $A_n$ , y la superficie de la garganta, $A_t$ , en función del diámetro de garganta.	82
3.9.5. Altura entre la rejilla que define el volumen de la cámara de reducción y la garganta.	84
4. DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS.	85
4.1. PRUEBAS HECHAS EN EL GASIFICADOR.	85
4.1.1. Metodología usada en las pruebas del gasificador.	86
4.1.2. Resultados obtenidos de las pruebas hechas al gasificador.	88
4.1.3. Modelo termodinámico aplicado para la determinación real de la eficiencia del gasificador.	90
4.1.3.1. Condiciones bajo las cuales se ejecuta el modelo termodinámico escogido.	90
4.1.3.2. Proceso para determinar el flujo másico de gases pobres producido por el gasificador.	91

4.1.3.3. Proceso para determinar el flujo másico de aire necesario para quemar la corriente de gases pobres en el modelo termodinámico escogido.	93
4.1.3.4. Aplicación del modelo termodinámico escogido para determinar la eficiencia del gasificador.	95
4.2. PRUEBAS HECHAS AL GAS POBRE PRODUCIDO.	98
4.2.1. Prueba de combustión del gas pobre para determinar el comportamiento del gasificador.	98
5. CONCLUSIONES.	102
BIBLIOGRAFÍA.	106
ANEXOS.	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujos de energía solar almacenados en biomasa residual.	22
Figura 2. Residuos forestales.	28
Figura 3. Molino de martillo en proceso de trituración.	29
Figura 4. Biomasa residual forestal triturada.	30
Figura 5. Tamaños de grano de la biomasa triturada.	31
Figura 6. Secado del residuo forestal.	31
Figura 7. Procesos aplicados a la conversión energética de la biomasa.	32
Figura 8. Procesos termoquímicos de conversión, productos y utilización.	34
Figura 9. Proceso de gasificación.	36
Figura 10. Requerimientos para determinar el caudal de gas pobre a ser consumido por el motor de combustión interna.	43
Figura 11. Carga del hogar.	44
Figura 12. Zonas generadas en el proceso de gasificación.	45
Figura 13. Reacciones químicas más importantes del proceso de gasificación de biomasa.	47
Figura 14. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo (Updraft).	52
Figura 15. Gasificador de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft).	53
Figura 16. Clasificación de los gasificadores de tiro invertido.	55
Figura 17. Gasificador de tiro transversal.	56
Figura 18. Gasificador de lecho fluidizado.	58
Figura 19. Forma general del diseño a construir.	59
Figura 20. Curva de rendimiento del motor Kubota DG972-E2.	60

Figura 21. Principales dimensiones de los gasificadores de tipo normal para astillas de madera.	71
Figura 22. Altura del plano de los inyectores sobre la garganta, $h_{nt}$ , en función del diámetro de la garganta ( $dt$ ).	72
Figura 23. Diámetro del hogar, $dr$ , en función del diámetro de garganta ( $dt$ ).	73
Figura 24. Diámetro del anillo que forman los extremos de las toberas que inyectan el aire al gasificador.	74
Figura 25. Combustión con llama y combustión sin llama en la cámara de combustión.	75
Figura 26. Diámetro del anillo de las puntas de las toberas, $d_{nt}$ , en función del diámetro de garganta, $dt$ .	76
Figura 27. Relación entre la superficie total de las toberas y la superficie de garganta.	77
Figura 28. Forma definida del diseño a construir.	79
Figura 29. Altura entre la entrada de aire y la garganta.	80
Figura 30. Dimensiones definidas para la cámara de combustión/reducción.	81
Figura 31. Diámetro de la zona de combustión.	82
Figura 32. Diámetro máximo teórico y diámetro utilizado.	83
Figura 33. Altura entre la garganta y la rejilla que define el volumen de la cámara de reducción.	84
Figura 34. Bridas superior e inferior, entrada de aire y rejilla.	85
Figura 35. Posiciones máxima y mínima de la cámara de reducción.	87
Figura 36. Modelo para determinar la eficiencia del gasificador.	90
Figura 37. Balance de masa en el gasificador.	92
Figura 38. Flujos másicos hallados para aplicar al modelo termodinámico planteado.	94

Figura 39. Elementos y moléculas presentes en los flujos másicos que alimentan la cámara de combustión.	96
Figura 40. Prueba de combustión del gas pobre para generar una noción del comportamiento del gasificador.	99
Figura 41. Prueba realizada al gas pobre producido por el gasificador.	100
Figura 42. Transferencia de calor de los gases de combustión al flujo de agua dentro del intercambiador de calor.	101

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría de la biomasa.	30
Tabla 2. Composición típica del gas de la gasificación de biomasa.	49
Tabla 3. Especificaciones generales del motor Kubota DG972-E2.	62
Tabla 4. Metodología usada en las pruebas del gasificador.	86
Tabla 5. Resultados obtenidos de la gasificación del residuo forestal de la UIS.	88

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL GASIFICADOR EN UN CORTE LONGITUDINAL DEL MISMO	108
--	-----

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GASIFICADOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.\*

**AUTOR:** FABIÁN YESID BARAJAS PEÑARANDA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Gasificación, proceso termoquímico, tacos de madera, astillas de madera, residuos forestales.

### DESCRIPCIÓN

El aprovechamiento energético de tacos de madera y carbón mediante la aplicación del proceso termoquímico de la GASIFICACIÓN es un proceso que se descubrió hace más de cien años, durante este tiempo su forma inicial se ha transformado para adaptarse a las condiciones fisicoquímicas que presentan los diferentes tipos de residuos orgánicos, esto con el objetivo de generar un mayor beneficio económico. Sabiendo que geográficamente Colombia es un país privilegiado en cuanto a la producción de grandes volúmenes de residuos de biomasa en los sectores agrícola, pecuario y residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU), se ha generado una investigación cuyo resultado ha sido el Diseño y Construcción de un pequeño gasificador, alimentado con astillas de madera provenientes de la trituración de los **residuos forestales** generados en el mantenimiento de la bóveda forestal del campus principal de la Universidad Industrial de Santander. De este modo se está generando un beneficio energético del tratamiento de los **residuos forestales**, sin desconocer que es necesario la aplicación de un nivel de energía mucho menor para acondicionar dichos residuos forestales al proceso termoquímico de la gasificación ; también es evidente la disminución en el nivel de contaminantes emitidos al ambiente para la transformación de un determinado nivel de energía , esto, en comparación con la quema de combustibles fósiles, además la gasificación también muestra independencia energética de los combustibles fósiles.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A GASIFIER FOR THE USE OF FOREST RESIDUAL BIOMASS ENERGY OF THE UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. \*

**AUTHOR:** FABIÁN YESID BARAJAS PEÑARANDA.

**KEY WORDS:** gasification, thermochemical process, wooden blocks, wood chips, forest residuals.

### DESCRIPTION

The energetic use of wooden blocks and charcoal through the application of a thermochemical process of the gasification is a process discovered for over one hundred years, and it is known that geographically Colombia is a privileged country regarding to the production of large volumes of residual biomass in agricultural sectors, livestock and urban solid organic residuals (RSOU), a research has been generated and the result has been the design and construction of a little gasifier fed with wood chips from **forest residues** without disclaim that it is necessary the application of lower energetic level to conditioner such **forest residues** to the thermochemical process of gasification; it is also evident the decline of the pollutant level released to the environment for the transformation of a given level of energy, gasification also shows energetic independence of the fossils flues; this in comparison with the burning of fossils flues.

---

\* Thesis of Grade

\*\* Physical – Mechanical Engineer Faculty, Mechanical Engineer School, Eng. Omar Gélvez.

## INTRODUCCIÓN

Contribuir al desarrollo de energías alternativas mediante el diseño y construcción de un gasificador orientado al aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander, fue el marco bajo el cual se llevó a cabo la investigación, además las consecuencias de la utilización de energías no renovables ha generado un notable impacto en la calidad del aire que se respira, alteración total en los ciclos de las estaciones y además impone elevados costos a los hidrocarburos para la generación de un determinado beneficio energético. El primer producto obtenido del proceso de Gasificación es un gas combustible denominado gas pobre, una característica importante es la materia prima utilizada para alimentar el Gasificador, son residuos forestales obtenidos del mantenimiento de la bóveda forestal de la Universidad Industrial de Santander que se acondicionan (granulometría y humedad) para posteriormente alimentar al Gasificador y así obtener el gas pobre, la denominación de gas pobre se debe al rango del Poder Calorífico del gas cuyos valores se encuentran entre 3000 y 7000 [KJ/m<sup>3</sup>]. La energía química obtenida en la corriente de gas pobre puede ser transformada en tres tipos de Energía:

1. Energía Térmica: (Sólo gasificador) Esta energía se obtiene cuando se oxida la energía química que contienen la corriente de gas pobre producida en el proceso de gasificación (caso único de este proyecto de grado).
2. Energía Mecánica: (Gasificador + Motor de C.I.) Esta energía se obtiene cuando se alimenta un motor de combustión interna con la corriente de gas pobre que produce el gasificador.
3. Energía Eléctrica: (Gasificador + Motor de C.I. + Generador) Esta energía se obtiene cuando la potencia mecánica que se tiene en el eje del motor de combustión interna alimenta un generador.

El segundo producto obtenido del proceso de gasificación es el Bio-carbón, residuo obtenido de dicho proceso y el cual se usa como fertilizante.

En el capítulo 1 se presenta una clasificación de los diferentes tipos de biomásas y los procesos aplicados a estos residuos para realizar una conversión energética.

En el capítulo 2 se describen las pruebas aplicadas al residuo forestal con el fin de caracterizar la biomasa mediante la medición de algunas variables físicas y químicas.

El capítulo 3 inicia con la teoría de la gasificación, pasando por los tipos de gasificadores para luego describir los procesos que ocurren en el gasificador de tiro invertido, y finalmente se determinan las dimensiones del gasificador de tiro invertido para Astillas de madera según las normas suecas.

Finalmente en el capítulo 4 se describirán las pruebas realizadas al gasificador y al gas pobre para determinar la potencia térmica de la corriente de gas pobre producida en el proceso de Gasificación de Biomasa residual forestal, para terminar con el capítulo 5 que habla sobre las conclusiones.

## **1. MARCO CONCEPTUAL.**

El aprovechamiento de los residuos orgánicos es un área en desarrollo, que en los últimos años ha tomado mayor acogida debido a factores como: la contaminación producida por los combustibles fósiles, mayores necesidades energéticas, disminución de fuentes de petróleo y elevados precios. En el caso particular del actual proyecto de grado, se tiene como objetivo el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal que se genera gracias al mantenimiento de la bóveda forestal de la Universidad Industrial de Santander, el aprovechamiento de la biomasa residual como una fuente energética se direcciona hacia el uso común y fácil en cualquier entorno social. A continuación se exponen algunos conceptos, clasificaciones, ventajas, desventajas y procesos aplicados para la conversión energética de la biomasa, de forma tal que proporcionen una noción clara de los alcances que esta alternativa energética nos muestra.

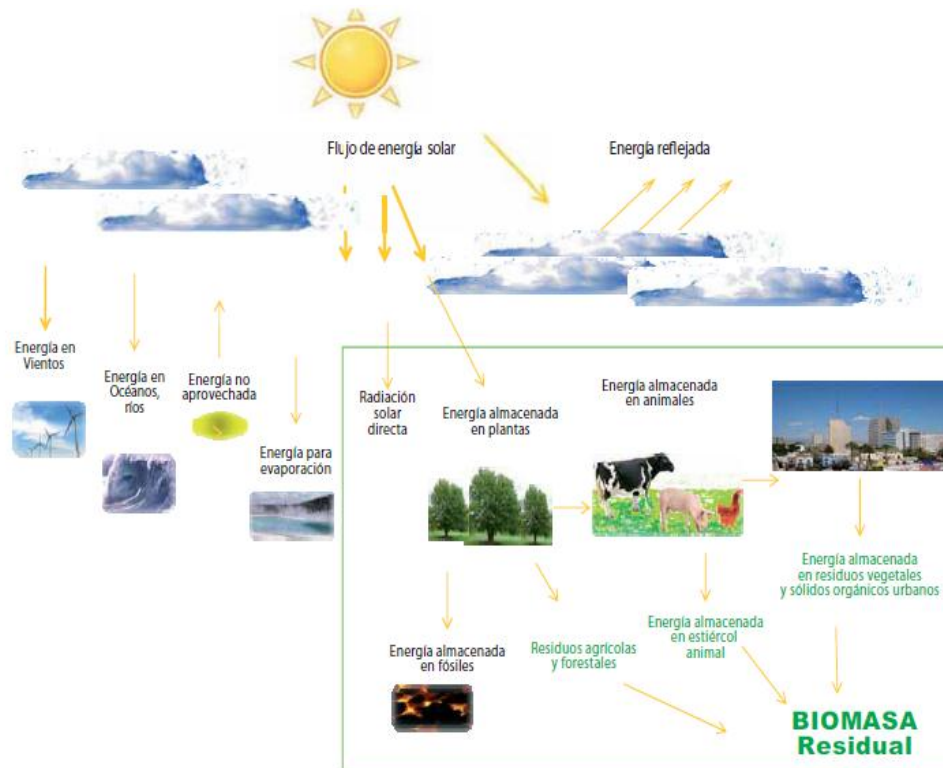
### **1.1. BIOMASA. [1]**

El motor principal de la dinámica de los ecosistemas es la energía solar, la cual de acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica, nunca se destruye, siempre se transforma. No toda la energía solar entra al ecosistema, una parte es absorbida y reflejada por las capas atmosféricas (ver figura 1). La energía solar es almacenada por las plantas mediante el proceso de fotosíntesis y fluye a lo largo de la cadena trófica siendo finalmente almacenada en la biomasa residual.

Biomasa es la materia viva presente en una capa muy fina de la superficie terrestre llamada biosfera, la cual representa una fracción muy pequeña de la masa terrestre. Los residuos que se generan a partir de los procesos de transformación natural o artificial de la materia viva, también se constituye en biomasa.

La biomasa es un recurso muy variado debido a su producción y origen en los sistemas terrestres y acuáticos, lo que influye directamente sobre sus características físicas y químicas.

Figura 1. Flujos de energía solar almacenados en biomasa residual.



Fuente: [1] Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.

Se considera que la biomasa es renovable porque forma parte del flujo natural y repetitivo de los procesos en la naturaleza (a escala de tiempo de vida humana) siendo las plantas quienes inician este proceso con la fotosíntesis, para captar la energía del sol. La biomasa es un elemento indispensable para mantener el equilibrio ecológico y permite conservar y enriquecer la diversidad biológica y el suelo.

La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica. Algunos ejemplos de biomasa son los residuos de cosechas, las podas de zonas verdes urbanas, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado.

En la composición de la biomasa se encuentran grandes cantidades de carbono, oxígeno e hidrógeno. Las cadenas largas del tipo  $C_n H_m$ , constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía. Por consiguiente la biomasa presenta una gran cantidad de energía almacenada en su conjunto de componentes orgánicos de origen vegetal y animal.

Cuando la biomasa se somete a un proceso de combustión, el aporte al calentamiento global por sus emisiones de  $CO_2$  es neutro, lo cual significa que su uso como recurso energético no contribuye a aumentar la proporción de  $CO_2$  en la atmósfera, siempre y cuando exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía.

**1.1.1. Fuentes de generación de biomasa residual.** [1] La producción de bienes y servicios para la sociedad requiere de la transformación física y química de la materia e involucra en algunos casos biomasa residual. Existen dos fuentes de biomasa residual para la producción de energía: las actividades agroindustriales y las sociales de la comunidad. En el caso de la cadena agrícola se distinguen los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) y los Residuos Agrícolas Industriales (RAI). Ejemplos de estos tipos de biomasa son los residuos de cuercos y raquis en las plantaciones de palma, los frutos, hojas y tallos de descarte de las cosechas y las excretas de cerdos, aves de corral y reses; en el segundo caso las actividades domésticas y las cadenas comerciales o de industrias de alimentos o de productos vegetales originan los grandes volúmenes de residuos orgánicos urbanos.

Estos residuos pueden utilizarse para la generación de energía a gran escala y la sustitución de combustibles, de acuerdo con la disponibilidad de tecnologías de segunda y tercera generación. Sin embargo el aprovechamiento de la biomasa residual depende fuertemente de la facilidad de recolección, por lo cual el análisis de su dispersión geográfica es de significativa importancia para valorar su uso.

**1.1.1.1. Biomasa residual del sector agrícola.** [1] La agricultura es una actividad antropogénica que genera cantidades considerables de biomasa residual. En el caso del presente estudio (Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia), el 75% del total de la biomasa producida en el campo corresponde a RAC, y el restante a RAI. Un porcentaje de los RAC debe ser dejado en el campo para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos. El excedente recolectado de los residuos se aprovecha para diferentes propósitos. Por ejemplo los residuos de la caña de azúcar se emplean para la generación de vapor, como sustituyente de la leña para la cocción de alimentos, para la producción de compost y como alimento animal.

**1.1.1.1.1. Residuos forestales.** [1] Estos residuos constituyen una importante fuente de biomasa residual. Por cada árbol utilizado para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que en la cadena agrícola, un 40% de la biomasa se deja en el campo en forma de hojas y ramas, y el restante 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

**1.1.1.1.2. Cultivos energéticos.** [1] Corresponden a plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para este fin se seleccionan plantas de crecimiento rápido y poco mantenimiento, las cuales normalmente se cultivan en tierras de

bajo valor productivo. Algunos cultivos como la palma de aceite, el girasol, la soya, la higuera, la jatropha, el maní y plantas acuáticas, como el jacinto de agua y ciertas algas, se emplean para producir combustibles líquidos como el biodiesel. Por otra parte la caña de azúcar, el maíz, el sorgo, la remolacha, la yuca y el trigo se utilizan en la producción de bioetanol.

Actualmente en Colombia sobresalen dos ejemplos de cultivos energéticos importantes: la caña de azúcar para la producción de alcohol y la palma de aceite para obtener biodiesel.

**1.1.1.2. Biomasa residual del sector pecuario.** [1] El estiércol animal constituye una fuente importante de biomasa residual. Su composición se caracteriza principalmente por:

- Alto contenido de humedad, lo cual dificulta la valorización energética.
- Cantidad de material sólido variable, dependiendo del sistema de producción.
- Ser un material fermentable que desprende vapores, gases y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).
- Poseer elevados niveles de concentración de nutrientes inorgánicos como el nitrógeno y el fósforo. Por consiguiente cuando esta biomasa se vierte en el agua disminuye la cantidad de oxígeno disuelto y se incrementa el crecimiento de algas y de macrofitas acuáticas.

**1.1.1.3. Biomasa residual del sector residuos urbanos.** [1] Los centros urbanos generan los denominados residuos sólidos urbanos que provienen de diferentes actividades y están constituidos por cantidades considerables de residuos como el papel, madera, carbón vegetal, alimentos, aguas negras y

residuos vegetales provenientes de la poda de zonas verdes, los cuales constituyen su fracción orgánica.

Cuando su fracción orgánica se descompone, estos residuos generan compuestos volátiles como el metano y el dióxido de carbono, que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Por su composición fisicoquímica se considera que los residuos sólidos orgánicos poseen un considerable valor energético.

**1.1.2. Ventajas del uso de la biomasa.** La utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas medioambientales:

- Cuando la biomasa se somete a un proceso de combustión, el aporte al calentamiento global por sus emisiones de CO<sub>2</sub> es neutro, lo cual significa que su uso como recurso energético no contribuye a aumentar la proporción de CO<sub>2</sub> en la atmosfera, siempre y cuando exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía. [1]
- Mediante la aplicación del proceso de conversión energético de la Gasificación a los residuos de biomasa (residuos forestales, cascarilla de arroz), se puede obtener un **gas combustible**, el cual abre el abanico de aplicaciones energéticas, además de la energía Térmica se puede generar un beneficio Mecánico y Eléctrico.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas.[2]
- Puede provocar un aumento económico en el medio rural.[2]
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles. [2]

En la actualidad la tecnología aplicada a la biomasa está sufriendo un gran desarrollo. La investigación se está centrando en los siguientes puntos:

- En el aumento del rendimiento energético de este recurso.[2]

- En minimizar los efectos negativos ambientales de los residuos aprovechados y de las propias aplicaciones.[2]
- En aumentar la competitividad en el mercado de los productos.[2]

**1.1.3. Inconvenientes del uso de la biomasa.** En comparación con los combustibles fósiles, la biomasa posee un contenido energético menor. La razón es que la biomasa tiene una mayor relación de oxígeno e hidrógeno con respecto al carbono y justamente la mayor cantidad de energía se almacena en las cadenas carbono – carbono. [1]

**1.1.3.1. Recolección, transporte y utilización de la biomasa.** Las condiciones para la recolección, el transporte y la transformación tecnológica de la biomasa, son factores determinantes en la evaluación de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. [1]

Un estudio que busque evaluar la utilización de la biomasa como fuente alterna de energía con respecto a un proceso convencional, debe involucrar un análisis de las variables: localización del residuo, localización de la planta de procesamiento y lugar de utilización de la energía convertida. Estos aspectos deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del proceso por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional. [1]

En el caso de la Universidad Industrial de Santander, se cuenta con mano de obra para la recolección y con la maquinaria necesaria para transportarla a la planta de compost para su posterior tratamiento.

**1.1.3.2. Adecuación de la materia prima.** Este numeral trata sobre los procesos que se aplicaron al residuo forestal que se encontró en la planta de compost de la

Universidad Industrial de Santander para que la biomasa estuviera apta para el proceso de Gasificación.

**1.1.3.2.1. Etapa de trituración.** En la planta de compost de la Universidad Industrial de Santander se seleccionaron residuos forestales que ya contaban con varias semanas de estadía en dicha planta, en la figura 2 se observan los residuos forestales que fueron posteriormente triturados.

Figura 2. Residuos forestales.



Foto tomada en la planta de compost de la Universidad Industrial de Santander.

La etapa de triturado se desarrolló utilizando un molino de martillo que tiene las siguientes características:

- Tipo de molino: Martillo
- Potencia de consumo motor principal: 15[HP]  $\cong$  11.18 [KW]
- Potencia de consumo motor secundario : 1 [HP]  $\cong$  0.75 [KW]

- Consumo de potencia total : 16 [HP]  $\cong$  12 [KW]

En la figura 3 se muestra el molino de martillo utilizado para llevar a cabo la trituración del residuo forestal.

Figura 3. Molino de martillo en proceso de trituración.



Foto tomada en la planta de compost de la Universidad Industrial de Santander.

Después de pasada la biomasa por el molino de martillo se genera una biomasa que presenta una granulometría definida por la separación de las cuchillas del molino, en la figura 4 se puede observar cómo queda la biomasa después del proceso de triturado.

Figura4. Biomasa residual forestal triturada.



Fotos tomadas en la planta de compost de la Universidad Industrial de Santander.

La granulometría está definida según se muestra en la tabla 1, en esta tabla se establecen tres tamaños de tamizaje.

Tabla 1. Granulometría de la biomasa.

Mínimo tamaño [mm] (Alto*ancho*largo)	Máximo tamaño [mm] (Alto*ancho*largo)	Porcentaje en peso presente en la muestra.
	0.5*0.5*1	15 gramos $\cong$ 5.45 %
0.5*0.5*1	6*4*15 (Astillas esbeltas)	115 gramos $\cong$ 41.81 %
6*4*15	15*10*30	145 gramos $\cong$ 52.72%

Fuente: Tabla realizada para este proyecto de grado.

Una muestra de 275 gramos de residuo forestal triturado se hace equivalente al 100%, luego se pasa toda la muestra por una malla de 1[mm]\*1[mm] para establecer el primer tamaño de grano, para el segundo tamaño de grano se pasa la muestra restante por una malla de 10[mm]\*10[mm] y así se establece el segundo tamaño de grano, para el tercer tamaño de grano la muestra resultante

no es sometida a tamizaje. En la siguiente figura se pueden ver los tres tamaños de grano que se establecen según el proceso descrito anteriormente.

Figura 5. Tamaños de grano de la biomasa triturada.



Foto tomada en el desarrollo de este proyecto de grado.

**1.1.3.2.2. Etapa de secado.** En la figura 6 se observa cómo se ejecuta el proceso de secado.

Figura 6. Secado del residuo forestal.



Fotos tomadas en la planta de compost de la Universidad Industrial de Santander.

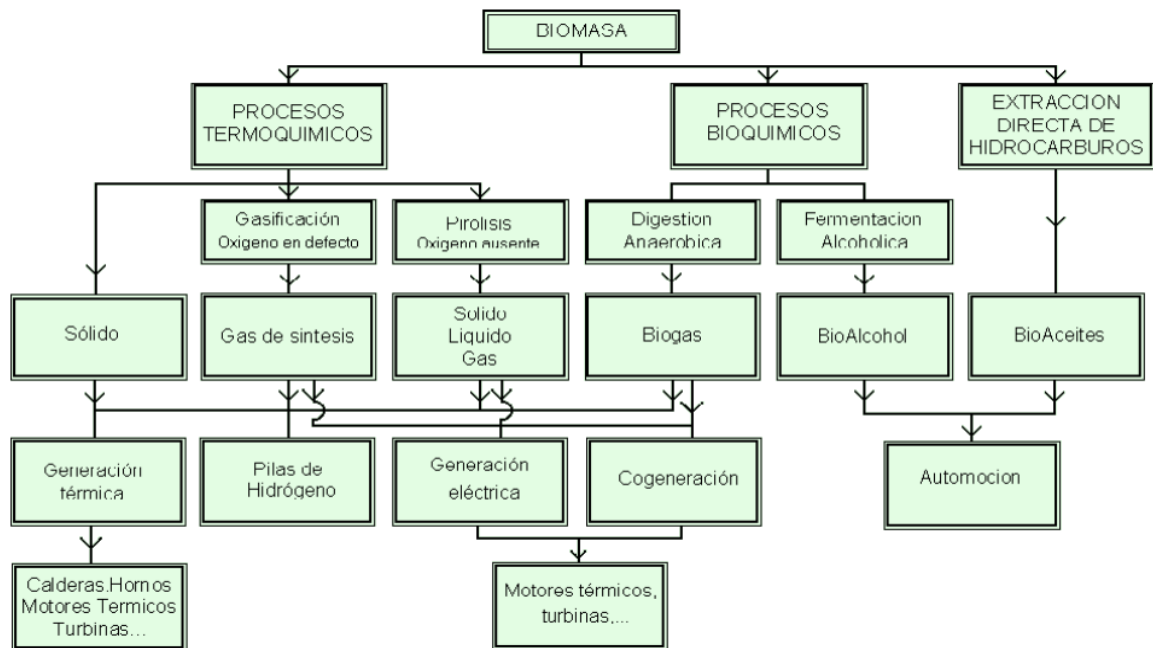
Se utilizó un plástico negro sobre el cual se extendió un volumen de aproximadamente 0.5 [m<sup>3</sup>] de biomasa a secar por sesión de 4 a 5 horas diarias, también se puso una pequeña estructura para permitir el flujo de aire, luego se cubrió con el mismo plástico (ver figura 6) y se tensionaron los extremos del

plástico para permitir el flujo de aire. El área superficial sobre la cual incidió la radiación solar fue de 30 [m<sup>2</sup>] y se pudo secar aproximadamente 3 [m<sup>3</sup>] de biomasa residual para ser sometida al proceso de Gasificación, el tiempo total de secado que recibió toda la biomasa residual fue de 40 horas, equivalente a 8 días.

## 1.2. PROCESOS APLICADOS PARA LA CONVERSIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA.

La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, mediante procesos de conversión *térmicos y biológicos*. [1]

Figura 7. Procesos aplicados a la conversión energética de la biomasa.



Fuente: <http://193.146.36.56/catedra/catedra/apuntes/PDFs/COMBUSTION/COMBUSTION.pdf>

**1.2.1. Procesos bioquímicos.** [6] Los procesos bioquímicos se basan en la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos.

**1.2.1.1. Tipos de procesos bioquímicos.** [6] Existen dos tipos de procesos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos).

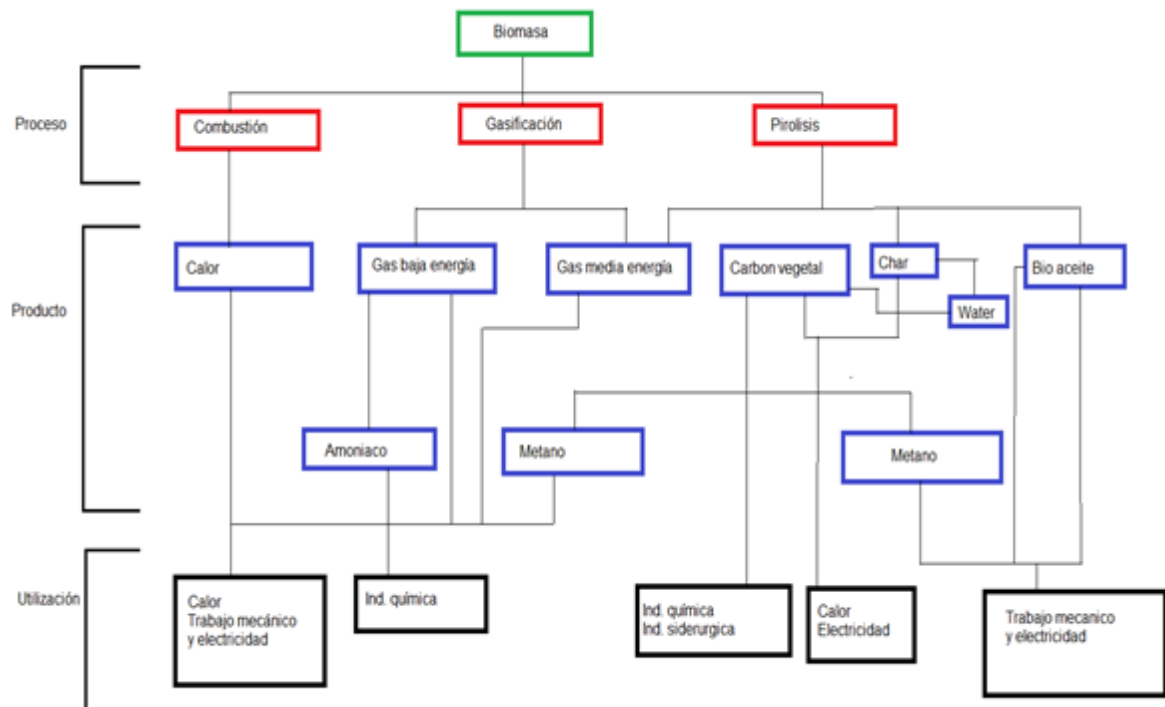
- **Procesos anaeróbicos (ausencia de aire):** La fermentación anaeróbica, para la que se utilizan generalmente residuos animales o vegetales de baja relación carbono/nitrógeno, se realiza en un recipiente cerrado llamado “digestor” y da origen a la producción de un gas combustible denominado biogás. Adicionalmente, la biomasa degradada que queda como residuo del proceso de producción del biogás, constituye un excelente fertilizante para cultivos agrícolas. Las tecnologías disponibles para su producción son muy variadas, pero todas ellas tienen como común denominador la simplicidad del diseño y el bajo costo de los materiales necesarios para su construcción. El biogás, constituido básicamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), es un combustible que puede ser empleado de la misma forma que el gas natural. También puede comprimirse para su uso en vehículos de transporte, debiéndose eliminar primero su contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- **Procesos aeróbicos (presencia de aire):** La fermentación aeróbica de biomasa de alto contenido de azúcares o almidones, da origen a la formación de alcohol (etanol), que, además de los usos ampliamente conocidos en medicina y licorería, es un combustible líquido de características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo. Las materias primas más comunes utilizadas para la producción de alcohol son la caña de azúcar, mandioca (yuca), sorgo dulce y maíz. El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener

una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación.

**1.2.2. Procesos termoquímicos.** [1] Este proceso utiliza condiciones controladas de temperatura y presión como fuente de transformación de la biomasa.

**1.2.2.1. Tipos de procesos termoquímicos.** Existen tres tipos de procesos: la combustión, la pirólisis y la gasificación. Lo que define cada tipo de proceso es la cantidad de oxígeno presente en cada proceso. En la figura 8 se observan los procesos térmicos de conversión, los productos obtenidos y su utilización.

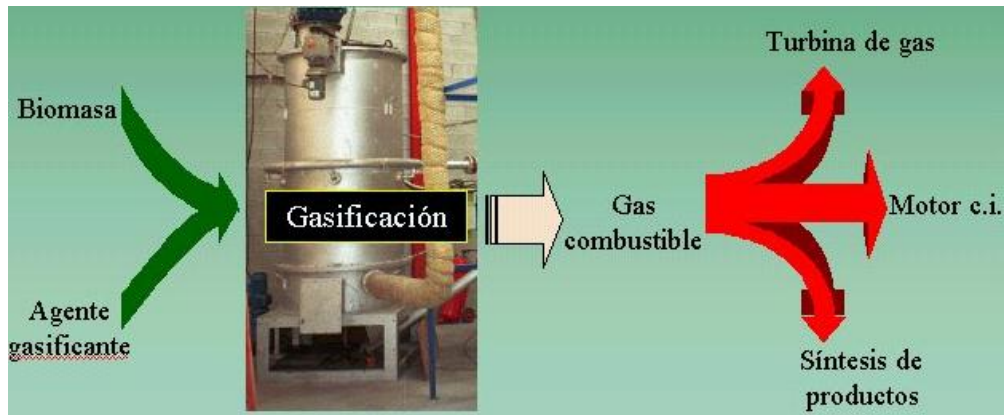
Figura 8. Procesos termoquímicos de conversión, productos y utilización.



Fuente: <http://193.146.36.56/catedra/catedra/apuntes/PDFs/COMBUSTION/COMBUSTION>.

- **Proceso de combustión:** La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego. Esta energía puede ser utilizada directamente (para cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas) o indirectamente (para producir electricidad a través de turbinas, previa evaporación del agua por medio del calor producido en la combustión).
- **Proceso de pirólisis:** Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno. La pirólisis se realiza con temperaturas de entre 400 °C y 800 °C. A estas temperaturas los residuos se transforman en gases, líquidos y cenizas sólidas denominadas coque de pirólisis. Las proporciones relativas de los elementos producidos dependen de la composición de los residuos, de la temperatura y del tiempo que ésta se aplique.
- **Proceso de gasificación:** La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) es transformado en un gas combustible de bajo poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante. El agente gasificante puede ser tanto aire, oxígeno, aire enriquecido con oxígeno, vapor de agua o hidrógeno, de modo que se obtienen diferentes valores de poder calorífico inferior del gas pobre (en función del agente gasificante), que a su vez pueden tener diferentes utilidades.

El aprovechamiento energético de este gas pobre puede hacerse quemándolo inmediatamente en una cámara de combustión, o introduciéndolo en una turbina de gas o un motor de combustión interna.



Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.

La caracterización de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander contempló la determinación de los parámetros que describen la composición de la materia orgánica correspondiente a un análisis fisicoquímico y de contenido energético. Las pruebas que caracterizaron la biomasa residual forestal UIS se desarrollaron en los laboratorios de la Planta de Aceros Álvaro Quiroga Correa de la Universidad Industrial de Santander.

### 2.1. VARIABLES FÍSICAS MEDIDAS EN EL RESIDUO FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Como variables físicas se evaluaron la densidad aparente y la humedad.

**2.1.1. Densidad aparente.** [1] Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico en que se presenta en condiciones dadas. Los combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requieren equipos de menor tamaño y permiten aumentar los periodos entre cargas. Por otro lado, los materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.

Para nuestro caso el valor determinado de densidad aparente o media fue de:

$$\rho = \frac{m}{v} = 275 \text{ [kg de material secado/m}^3 \text{]}$$

**2.1.2. Humedad.** [1] Es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca.

El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad. La biomasa con una humedad inferior al 50% pueden ser aprovechadas térmicamente mediante el proceso de **combustión directa, pirólisis o gasificación**. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%.

Cuando los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy elevado es necesario, antes de ingresar al proceso de conversión de energía, implementar operaciones de secado las cuales incrementan los costos de su aprovechamiento energético. Por lo anterior, es recomendable que una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% sea aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia.

Para nuestro caso el valor determinado de humedad fue de:

$$Hu = 0.075 \left[ kg \text{ de } \frac{\text{agua}}{kg} \text{ de material seco} \right]$$

Hay que tener en cuenta que el valor de la humedad se ha determinado después de que la materia prima se ha sometido al proceso de secado descrito en el capítulo anterior.

## **2.2. VARIABLES QUÍMICAS MEDIDAS EN EL RESIDUO FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.**

En cuanto a las variables químicas se incluyó únicamente el análisis próximo.

**2.2.1. Análisis próximo.** Estos análisis se expresan en base seca, razón por la cual se requiere previamente evaluar el contenido de humedad.

El análisis próximo determina en la muestra el contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo.

**2.2.1.1. Cenizas (Cz).** [1] Corresponde a la cantidad de materia sólida no combustible presente en un material. Es usual expresar la cantidad de ceniza por kilogramo de muestra. El poder calórico de un material se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas. Un alto contenido de cenizas en un residuo biológico es perjudicial para su aprovechamiento energético por vías térmicas ya que reduce su poder calorífico. Las cenizas tienden a depositarse en las tuberías de las calderas e intercambiadores, ocasionando dificultad en la transmisión del calor. Sin embargo, la eliminación de las cenizas presentes en un compuesto, implica el uso de tecnologías complejas y costosas.

**2.2.1.2. Material Volátil (MV).** [1] Está constituido por combinaciones de carbono, hidrogeno y otros elementos. El material volátil se determina calentando la muestra en un crisol tapado durante siete minutos a 950 °C; a esta temperatura se lleva a cabo un proceso de descomposición de la materia orgánica por ruptura de enlaces químicos (pirólisis). La pérdida en peso que sufre la muestra, una vez descontada su humedad, indica la cantidad de compuestos gaseosos producidos en la descomposición de la sustancia carbonosa.

**2.2.1.3. Carbono Fijo (CF).** [1] Es la fracción de carbono residual que permanece luego de retirar de la muestra la humedad, las cenizas y el material volátil. Por consiguiente se puede calcular el porcentaje de carbono fijo = 100 – porcentaje de humedad – porcentaje de material volátil – porcentaje de ceniza. El carbono fijo es el compuesto que no destila cuando se calienta un combustible.

Desde el punto de vista energético, no todos los volátiles presentes en el material aportan energía. La cantidad de material volátil y carbono fijo presentes en la biomasa, permiten establecer la facilidad con la cual el residuo reacciona, se oxida y se gasifica. La ocurrencia de uno u otro tipo de reacción depende del tipo de proceso utilizado para el aprovechamiento energético de la biomasa.

### **2.3. CONTENIDO ENERGÉTICO DEL RESIDUO FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.** [1]

Una de las características más importantes de los combustibles es su contenido energético, el cual puede obtenerse de su transformación y uso. Esta propiedad es fundamental para determinar el tipo de biomasa que puede utilizarse como combustible.

Algunos combustibles tienen mayor facilidad o dificultad para arder cuando son sometidos al proceso químico de oxidación. Sin embargo, la calidad de un combustible está determinada por la cantidad de energía que contiene y que puede liberar en el proceso de conversión energética. Esta cantidad de calor, referida a la unidad de masa, se denomina poder o potencia calorífica. El contenido energético de un compuesto se enuncia en unidades de energía por unidad de masa. Por ejemplo el poder calorífico se expresa en Joule por kilogramo [J/Kg] o calorías por gramo [cal/g].

La oxidación de la materia que contenga carbono e hidrógeno, para generar metano y agua, se denomina proceso de combustión y se lleva a cabo mediante una reacción química de oxidación exotérmica. El Poder Calórico Inferior (PCI) es

la variable que permite cuantificar la energía liberada en los proceso de combustión de la materia.

El uso de la biomasa residual como fuente de energía involucra conocer su PCI. En el caso de este estudio se encontró que la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander posee un valor de: 6920.17 [Btu/lb] o 16099596.21 [J/Kg]. Este valor se determinó procesando una muestra de residuo forestal en los laboratorios de la Planta de Aceros Álvaro Quiroga Correa de la Universidad Industrial de Santander.

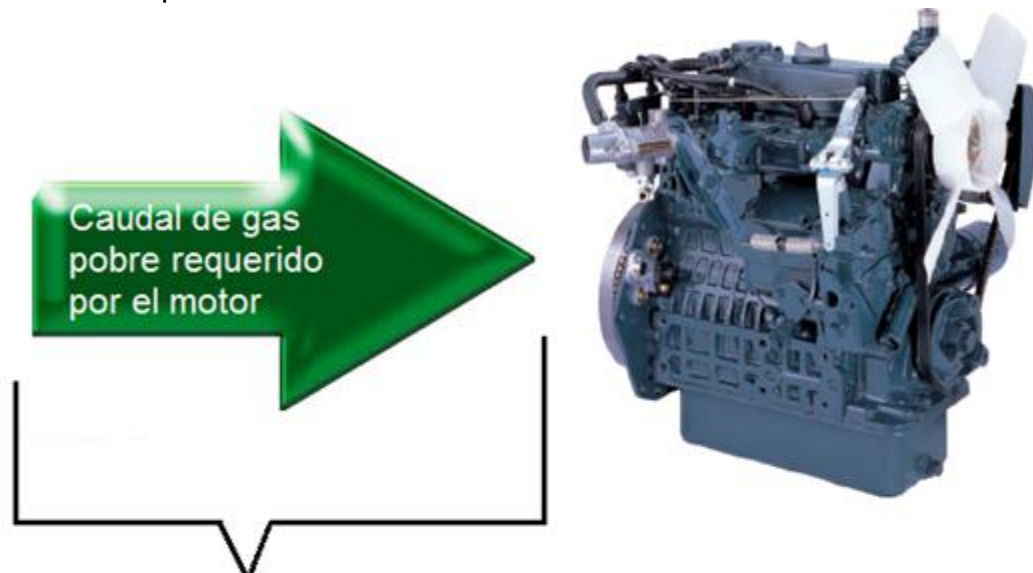
### 3. DISEÑO DEL GASIFICADOR.

Iniciando este capítulo tercero se hace una síntesis del diseño del gasificador con el objetivo de generar una noción del proceso a llevar a cabo en el diseño del gasificador , en la sección 3.1 se retoma la teoría de la gasificación, mostrando las zonas que se generan dentro de un gasificador de corriente descendente junto con las respectivas reacciones químicas que se desarrollan en dichas zonas, en la sección 3.2 se tratan los diferentes tipos de gasificadores, en la sección 3.3 se muestran las características principales que debe tener el diseño a construir. Basados en las siguientes características del Motor de Combustión Interna (M.C.I.): desplazamiento, revoluciones por minuto (máximas), eficiencia volumétrica y el hecho de que se debe suministrar 10% de exceso de aire para que se lleve a cabo una buena combustión del gas pobre dentro del motor de combustión interna, se determina el caudal de gas pobre que requiere dicho motor de combustión interna para que pueda funcionar, luego del cálculo del caudal de gas pobre para el funcionamiento del M.C.I. se determina teóricamente en las secciones 3.5, 3.6 y 3.7 la potencia térmica del caudal de gas pobre, la potencia en el eje del motor y la potencia eléctrica a generar , en la sección 3.8 se determina el diámetro de garganta del gasificador basado en la eficiencia térmica del gasificador y en el concepto de carga del hogar, para posteriormente aplicar dicho valor (diámetro de garganta del gasificador) a las normas y así diseñar el gasificador, y para finalizar este capítulo tercero se muestra la forma definida del diseño a construir.

El diseño de un gasificador tipo Imbert se reduce en la actualidad a calcular:

El caudal de gas pobre que requiere un motor de combustión interna para que pueda funcionar.

Figura 10. Requerimientos para determinar el caudal de gas pobre a ser consumido por el motor de combustión interna.



Los requerimientos para determinar el caudal de gas pobre necesario para alimentar el motor de combustión interna son :

- 1)Desplazamiento del motor.
- 2)RPM del motor.
- 3)Eficiencia volumétrica del motor.
- 4)Coeficiente estequiométrico (Aire/ Gas pobre) para un exceso del 10% de aire en la mezcla gas pobre- aire dentro de las cámaras de combustión del motor.

Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado basada en la información obtenida de [3]

Una vez determinado el caudal de gas pobre a ser consumido por el motor de combustión interna se procede a calcular:

El diámetro de la garganta del gasificador a través del concepto de Carga del hogar, dicho concepto relaciona el caudal de gas pobre determinado para el motor y la superficie de garganta del gasificador.

Figura 11. Carga del hogar.

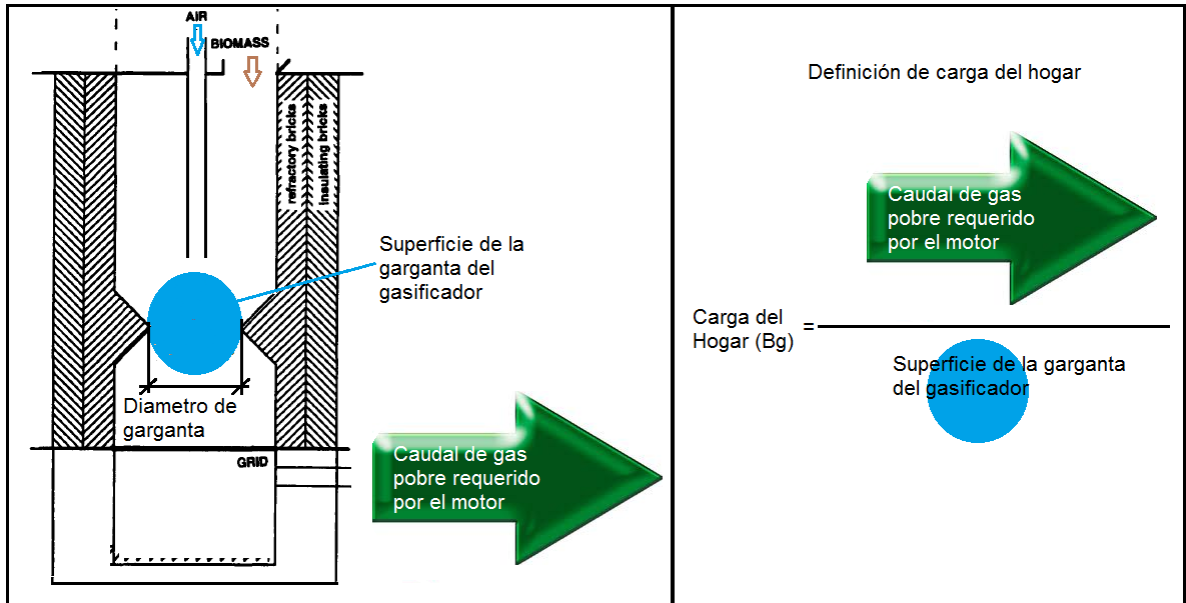


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado basada en la información obtenida de [3]

Una vez determinado el diámetro de garganta (dt) se procede a determinar las otras dimensiones del gasificador, pues las normas están en función del diámetro de garganta.

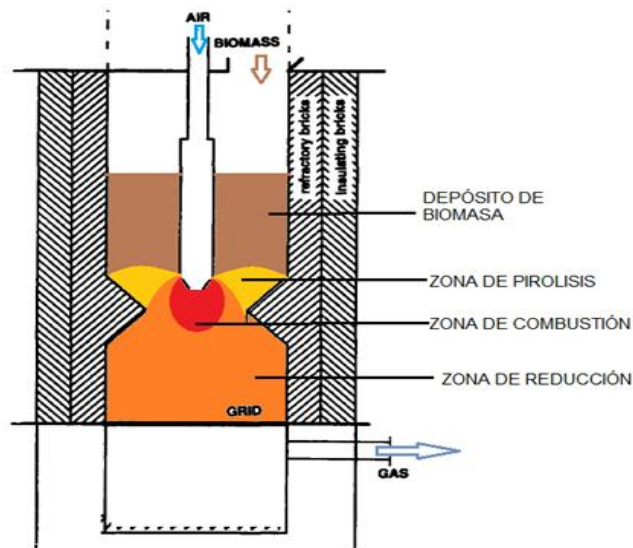
### 3.1. TEORÍA DE LA GASIFICACIÓN.

Esta sección sobre la Teoría de la Gasificación describe las zonas que se generan en el proceso de gasificación, luego expresa las reacciones químicas de la gasificación de la biomasa desarrolladas en estas zonas, también trata la reacción estequiométrica de la madera para la fórmula empírica que define a esta, de esta reacción estequiométrica se determina la relación aire/combustible para la combustión de la madera, seguidamente se muestra una tabla con los rangos en

volumen de los diferentes componentes presentes en una corriente típica de gas pobre y se finaliza esta sección con la eficiencia del gasificador.

**3.1.1. Zonas generadas en el proceso de gasificación.** En la figura 12 se observan las diferentes zonas que se generan en el proceso de gasificación.

Figura 12. Zonas generadas en el proceso de gasificación.



Fuente: Pedro Garcia-Bacaicoa, Rafael Bilbao, Jesús Arauzo & M. Luisa Salvador. (Figura modificada).

Cuando sometemos una sustancia a una acción térmica (calentamiento) sin la aportación de comburente exterior que contenga oxígeno (aire, agua, dióxido de carbono etc.) estamos refiriéndonos a las transformaciones que tengan lugar como transformaciones producidas en condiciones de *pirólisis*. [4](**Zona de pirólisis**).

Si el proceso tiene lugar con aportación de comburente exterior, de tal manera que la cantidad de oxígeno es claramente inferior a la necesaria para transformar los elementos químicos presentes en el material inicial en las formas oxidadas

estables (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) estamos refiriéndonos al proceso como un caso de **gasificación**. [4]

**Zona de combustión (C):** Se genera una combustión incompleta de la biomasa que se encuentra en la zona más próxima de la entrada de aire, en esta zona se produce calor y partículas de hollín, moléculas de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, dichas partículas y moléculas ingresaran a la siguiente zona, zona de reducción.

**Zona de Reducción (R):** En esta zona se consumen energía térmica y partículas de hollín que reaccionan con moléculas de monóxido de carbono, agua e hidrogeno, generando así las reacciones de reducción productoras de los gases combustibles presentes en la corriente de gas pobre producida.

### 3.1.2. Reacciones químicas de la gasificación de la biomasa. [5]

Biomasa + aire = CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + sólidos + ceniza

Reacciones químicas del oxígeno:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$



Reacciones químicas del vapor de agua:  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$

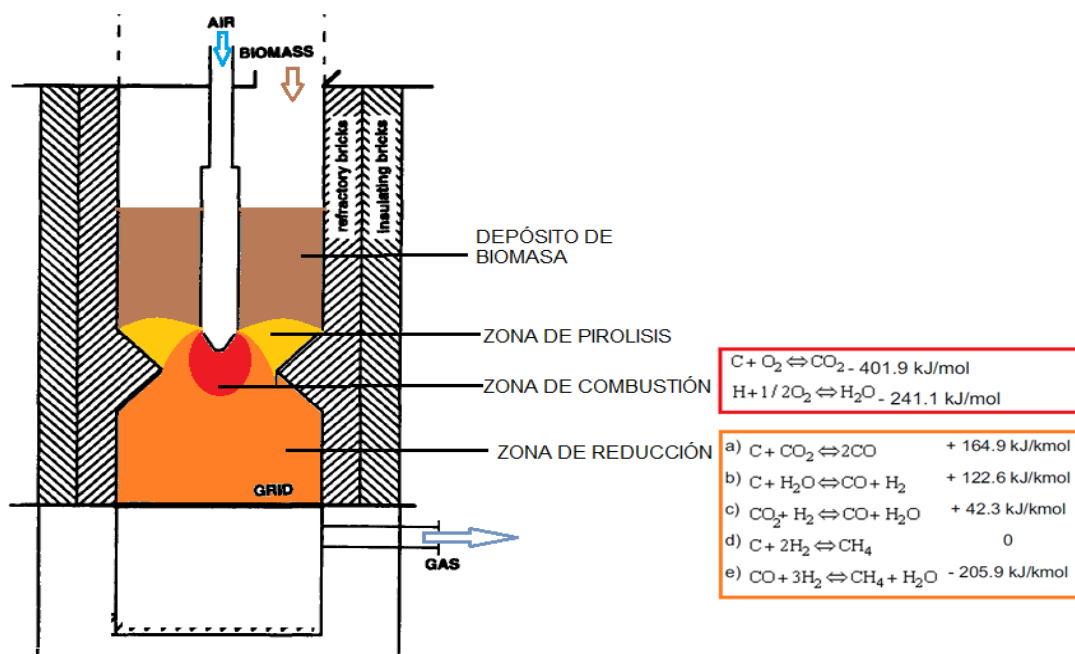


Reacciones químicas del metano:  $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$



En la figura 13 se muestran las reacciones más importantes que tienen lugar en la zona de reducción de un gasificador, entre los diferentes reactivos gaseosos y sólidos. El signo negativo indica que se genera calor en la reacción y el signo positivo que la reacción requiera calor.

Figura 13. Reacciones químicas más importantes del proceso de gasificación de biomasa.



Fuente: Pedro Garcia-Bacaicoa, Rafael Bilbao, Jesús Arauzo & M. Luisa Salvador.(Fig. modificada).

Las ecuaciones (a) y (b) que son las reacciones principales de reducción, demuestran que la reducción requiere calor. Por ello, la temperatura del gas disminuirá durante el proceso de reducción. [3]

**3.1.2.1. Reacción estequiométrica para la fórmula empírica que define a la madera.** Considerando un valor típico de madera seca en un análisis sobre base libre de cenizas y de azufre tendremos: [4]:

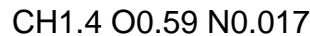
C → 52.50%

H → 6.16 %

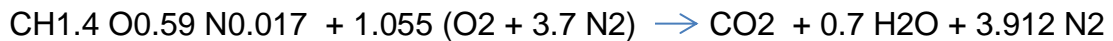
O → 41.24%

N → 0.10 %

La composición indicada define una madera de fórmula empírica.



Entonces el balance estequiométrico para la fórmula empírica de la madera será:



**3.1.2.2. Relación aire /combustible para la combustión de la madera.** La relación aire combustible da una cantidad utilizada para cuantificar la cantidad de aire en kilogramos por kilogramo de combustible. Para este caso se tiene:

$$r_{a/c} = \frac{1.055[2 \cdot 16 + 3.7 \cdot 2 \cdot 14]}{(12 + 1.4 \cdot 1 + 0.59 \cdot 16 + 0.017 \cdot 14)} = 6.2 \text{ [kg de aire/kg de combustible]}$$

Para la gasificación se necesita sólo el 30% del aire estequiométrico, esto da una relación aire /combustible (astillas de madera) de:

$$r_{a/c} = 1.86 \text{ [Kg de aire/ kg de combustible(astillas de madera)]}$$

**3.1.3. Rangos en volumen de los componentes presentes en una corriente de gas pobre.** Las condiciones influyentes en las reacciones químicas

(granulometría, forma y cantidad de aire que ingresa a la zona de combustión, flujo volumétrico de la biomasa en el gasificador, temperatura) hacen que estas ocurran en mayor o menor medida y en realidad el porcentaje en volumen de los productos obtenidos durante la gasificación de biomasa varía.

***Una alimentación única puede dar distribuciones de productos distintas según la velocidad de calentamiento, el tiempo de permanencia de los gases en el reactor y la temperatura alcanzada. [4]***

En la tabla 2 se muestra la composición típica del gas generado en el proceso de la gasificación de biomasa.

Tabla 2. Composición típica del gas de la gasificación de biomasa.

Componente	Contenido (%volumen)
Monóxido de carbono	20-25
Hidrogeno	15-20
Metano	1-2
Dióxido de carbono	10-12
Nitrógeno	48-50

Fuente: Dr. Ing. PT René Lesme Jaén. UNIVERSIDAD DE ORIENTE. CUBA.

**3.1.4. Eficiencia del gasificador.** [3] Un factor importante que determina el funcionamiento técnico real y la viabilidad económica de utilizar un sistema de gasificación, es la ***eficiencia de la gasificación.***

Una definición apropiada de la eficiencia de la gasificación si se emplea el gas para aplicaciones de motores es:

$$\eta_m = \frac{H_g * Q_g}{H_s * M_s} * 100(\%)$$

Dónde:

$\eta_m$  = eficiencia de la gasificación (%) (Mecánica).

$H_g$  = valor calorífico del gas (kJ/m<sup>3</sup>).

$Q_g$  = flujo en volumen de gas (m<sup>3</sup>/s).

$H_s$  = valor calorífico inferior del combustible del gasificador.

$M_s$  = consumo de combustible sólido del gasificador (kg/s).

Si se emplea el gas para combustión directa, la eficiencia de la gasificación se define a veces de la forma siguiente:

$$\eta_{th} = \frac{(H_g * Q_g) + (Q_g * \rho_g * C_p * \Delta T)}{H_s * M_s} * 100(\%)$$

Dónde:

$\eta_{th}$  = eficiencia de la gasificación (%) (Térmica).

$\rho_g$  = densidad del gas (kg/m<sup>3</sup>).

$C_p$  = calor específico del gas (kJ/kg.K).

$\Delta T$  = diferencia de temperaturas entre el gas en la entrada del quemador y el combustible que entra al gasificador (K).

Dependiendo del tipo y diseño del gasificador y también de las características del combustible, la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ) puede variar entre el 60 y el 75%. En el caso de aplicaciones térmicas, el valor de la eficiencia térmica ( $\eta_{th}$ ) puede llegar al 93%.

### 3.2 TIPOS DE GASIFICADORES.

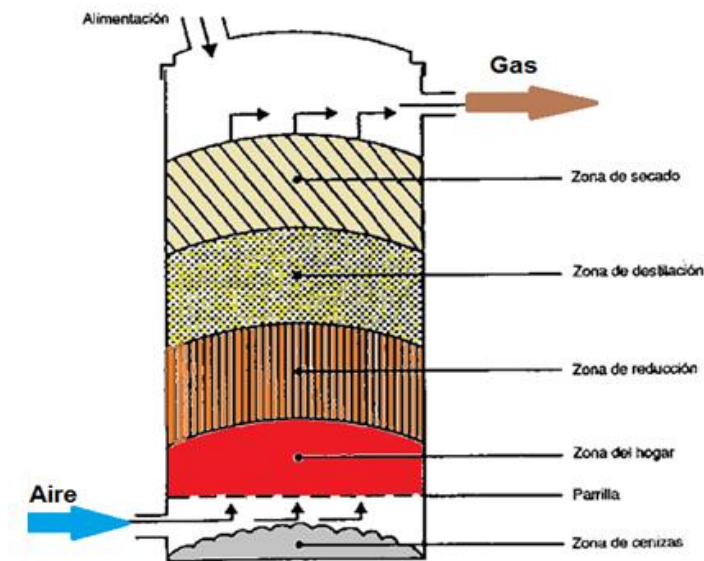
Los dispositivos de contacto entre el combustible y el comburente pueden ser muy diferentes, pero respecto al sentido de flujo del gas y del sólido a gasificar, los gasificadores se clasifican en los siguientes grupos:

- Gasificadores de corriente ascendente o tiro directo (Updraft).
- Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft).
- Gasificadores de tiro transversal.
- Gasificadores de lecho fluidizado.

**3.2.1. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo (Updraft).** [3] El tipo de gasificador más antiguo y sencillo es el de tiro directo o gasificador ascendente que se presenta esquemáticamente en la figura 14.

La toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba. Cerca de la parrilla, en el fondo, tienen lugar las reacciones de combustión, que van seguidas de reacciones de reducción algo más arriba en el gasificador. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirólisis de la carga, como resultado de la transferencia de calor por convección forzada y radiación de las zonas inferiores. Los alquitranes y productos volátiles producidos durante este proceso son transportados por la corriente de gas.

Figura 14. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo (Updraft).



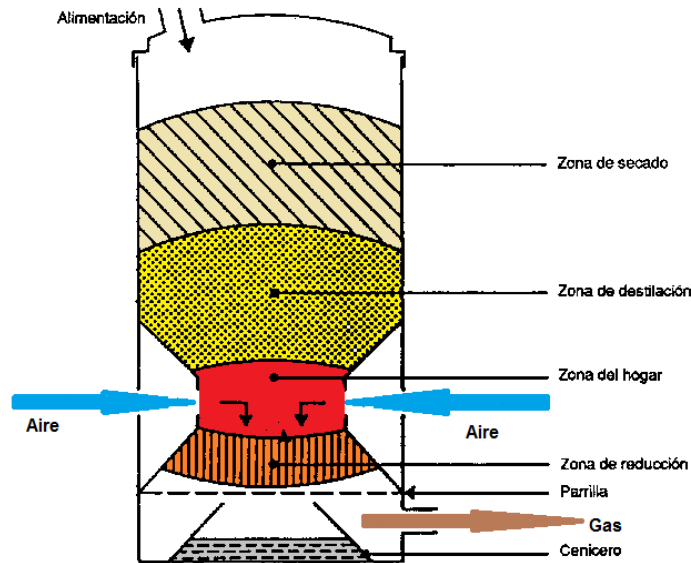
Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

Las principales ventajas de este tipo de gasificador consisten en su simplicidad, alta proporción de carbón vegetal quemado e intercambio interno de calor que motiva unas bajas temperaturas de salida del gas y alta eficiencia del equipo y también la posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga (serrín, cascara de cereales, etc.).

Los principales inconvenientes provienen de la posibilidad de que se produzcan "chimeneas" en el equipo, lo que puede motivar la salida de oxígeno y situaciones explosivas peligrosas y la necesidad de instalar parrillas de movimiento automático y también problemas relacionados con la eliminación de líquidos condensados que contienen alquitranes. Esto último tiene poca importancia si el gas se emplea para aplicaciones directas del calor, en cuyo caso los alquitranes simplemente se queman.

### 3.2.2. Gasificador de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft). [3]

Figura 15. Gasificador de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft).



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

Se ha encontrado una solución al problema del arrastre de alquitrán con la corriente de gas, diseñando gasificadores de tiro invertido o corriente descendente, en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de ésta. El gas pobre sale por el fondo del aparato de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección, como se muestra esquemáticamente en la figura 15.

En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman por ello en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano.

Dependiendo de la temperatura de la zona incandescente y del tiempo de paso de los vapores con alquitrán, se logra una descomposición más o menos completa de los alquitranes.

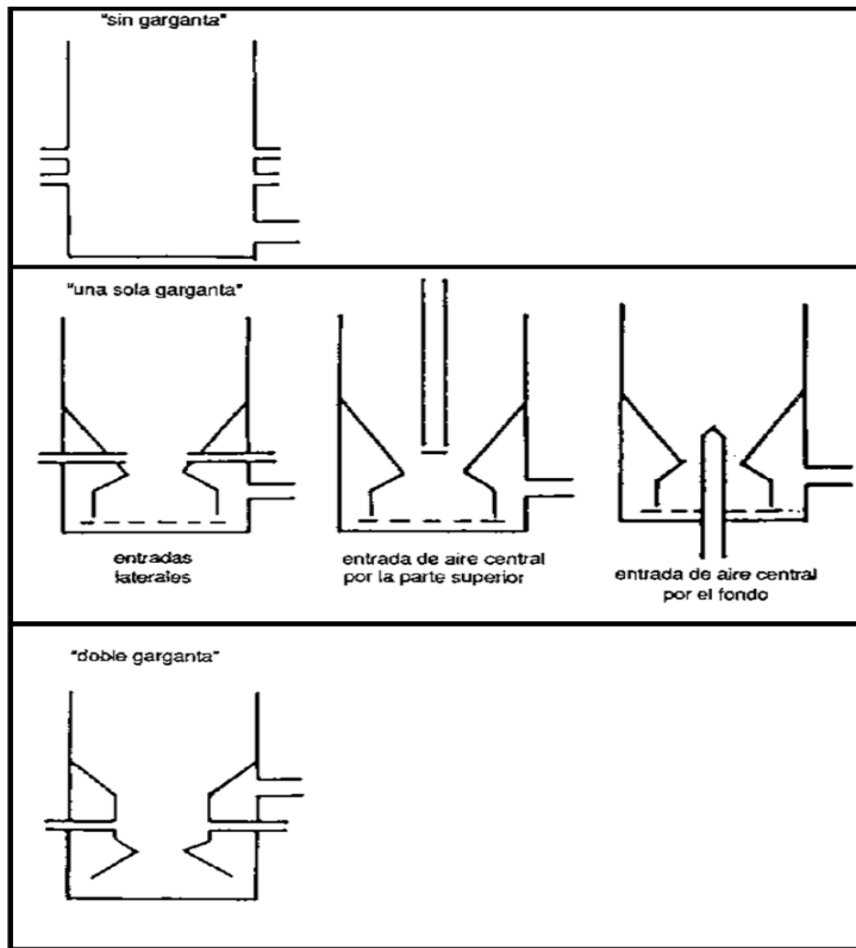
La principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radica en la posibilidad de producir un gas sin alquitrán apropiado para aplicarlo a motores, sin embargo, en la práctica es muy raro lograr un gas libre de alquitranes.

Un inconveniente importante de los equipos de tiro invertido es la imposibilidad de funcionar con una serie de combustibles no elaborados. En particular, los materiales blandos y de baja densidad ocasionan problemas de circulación y una caída excesiva de presión y, el combustible sólido hay que convertirlo en gránulos o briquetas antes de utilizarlo. Los gasificadores de tiro invertido sufren también los problemas relacionados con los combustibles de alto contenido de cenizas (formación de escoria), en mayor proporción que los gasificadores de tiro directo.

Un pequeño inconveniente del sistema de tiro invertido en comparación con el de tiro directo es su eficiencia algo inferior, debida a la falta de intercambio interno de calor y al menor valor calorífico del gas. Además de esto, la necesidad de mantener unas temperaturas altas uniformes en una sección transversal determinada, hace imposible el uso de los gasificadores de tiro invertido en una serie de potencias superior a los 350 kW (potencia en el eje).

En la figura 16 se muestran dos factores importantes: forma en que ingresa el aire y número de gargantas, subdividiendo así los gasificadores de tiro invertido.

Figura 16. Clasificación de los gasificadores de tiro invertido.

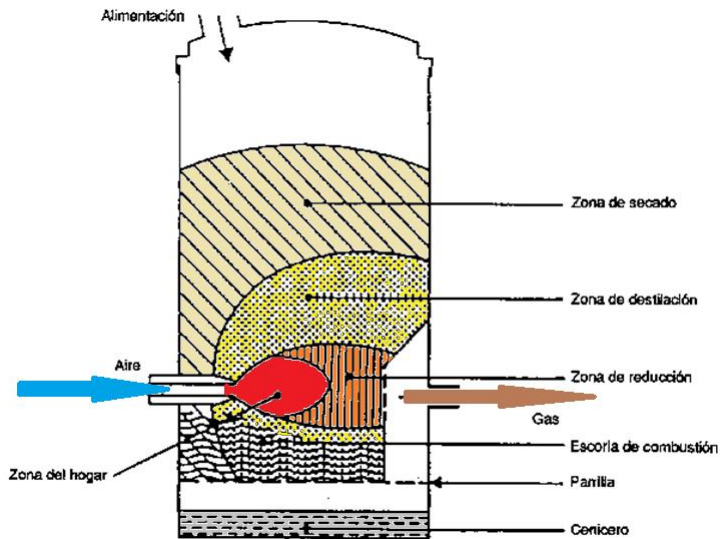


Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

[3] Compara las características de diseño de una serie de gasificadores que se podían obtener comercialmente durante la Segunda Guerra Mundial. Hace una distinción entre los diseños "sin garganta", de "una sola garganta" y de "doble garganta" (tipo Imbert) (véase la Figura 16). Llega a la conclusión de que los tres tipos difieren sobre todo en la carga máxima admisible del hogar, dando valores de (carga del hogar) Bs máximo de 0,03, 0,11 y 0,4 respectivamente para los gasificadores "sin garganta", "de una sola garganta" y "de garganta doble".

### 3.2.3. Gasificador de tiro transversal. [3]

Figura 17. Gasificador de tiro transversal.



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

El gasificador de tiro transversal, que se ilustra esquemáticamente en la figura 17 es una adaptación para el empleo de carbón vegetal. La gasificación del carbón vegetal produce temperaturas muy elevadas ( $1500^{\circ}\text{C}$  y más) en la zona de oxidación que pueden producir problemas en los materiales. En los gasificadores de tiro transversal, el propio combustible (carbón vegetal) sirve de aislamiento contra estas altas temperaturas.

La ventaja del sistema está en poder funcionar a pequeña escala, pudiendo resultar económicamente viable, en ciertas condiciones, instalaciones inferiores a 10 kW (potencia en el eje).

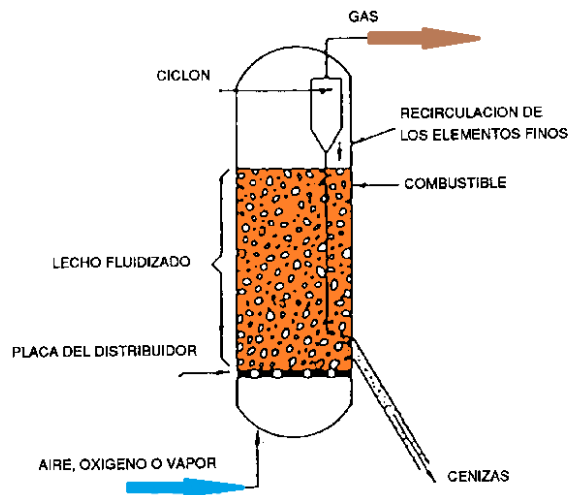
Un inconveniente de los gasificadores de tiro transversal es su capacidad mínima de transformación del alquitrán y la necesidad consiguiente de emplear carbón vegetal de alta calidad (bajo contenido de productos volátiles).

**3.2.4. Gasificador de lecho fluidizado.** [3] El funcionamiento de los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido se ve afectado por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible. Los problemas que se encuentran corrientemente son: la falta de tiro en el depósito, la formación de escoria y la excesiva caída de presión en el gasificador.

Un sistema de diseño que pretende eliminar tales dificultades es el gasificador de lecho fluidizado, que se ilustra esquemáticamente en la siguiente figura.

Se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Se comienza por calentar externamente el lecho y el material de alimentación se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho. Como resultado de este tratamiento, el combustible se piroliza muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes, con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos. En la fase de gas, se produce una nueva gasificación y reacciones de transformación de los alquitranes. La mayoría de los sistemas van equipados con un ciclón interno, a fin de reducir al mínimo el escape de alquitrán por soplado. Las partículas de ceniza se transportan también por la parte superior del reactor, debiendo extraerse de la corriente de gas si este se emplea en aplicaciones para motores.

Figura 18. Gasificador de lecho fluidizado.



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

### 3.3. FORMA GENERAL DEL DISEÑO A CONSTRUIR.

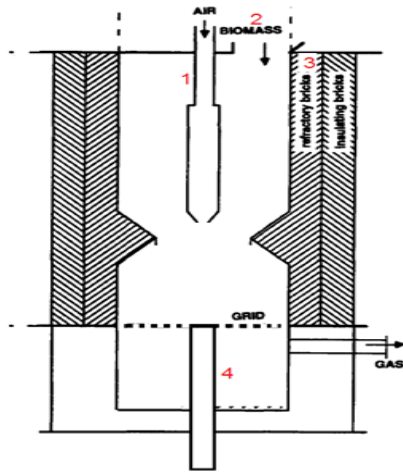
En la figura 19 se observa la forma general del diseño a construir.

Las características principales son:

1. Posee una entrada de aire central por la parte superior, esta tubería de alimentación de aire se puede mover hacia arriba o hacia abajo, esto con el fin de variar la altura de entrada de aire.
2. Posee una boquilla para la alimentación de biomasa.
3. La recámara de combustión/reducción se fabricará con material refractario.
4. La rejilla que define el volumen de la cámara de reducción se puede mover hacia arriba o hacia abajo, esto con el fin de variar el volumen de la cámara de reducción.

Las normas de diseño que están en la literatura se aplican a la forma general del diseño a construir.

Figura 19. Forma general del diseño a construir.



Fuente: Pedro Garcia-Bacaicoa, Rafael Bilbao, Jesús Arauzo & M. Luisa Salvador.(Figura modificada).

### 3.4. CALCULO DEL CAUDAL DE GAS POBRE QUE REQUIERE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA PARA QUE PUEDA FUNCIONAR. [3]

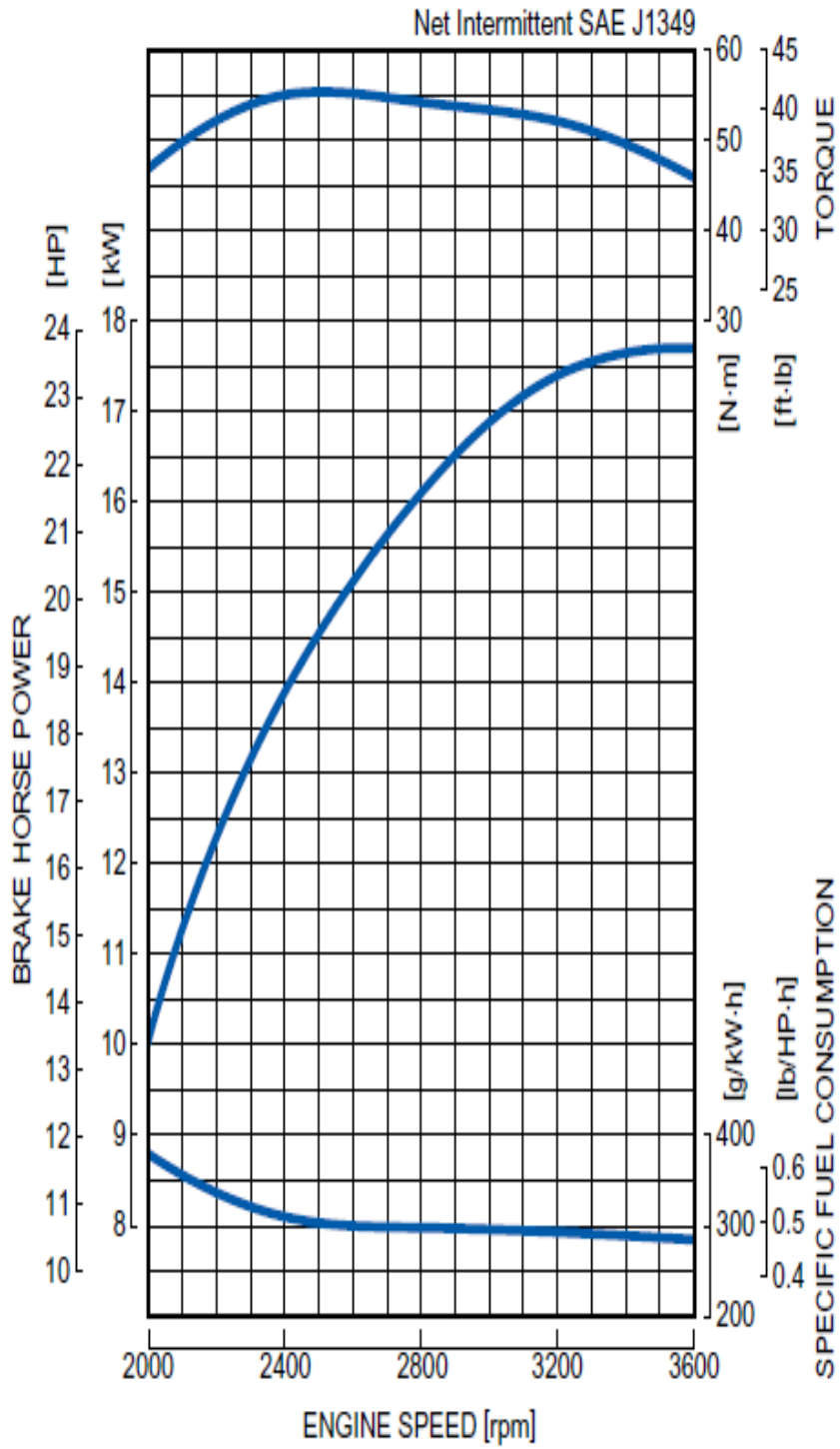
El diseño de un gasificador de tipo "Imbert" se reduce en la actualidad a calcular la cantidad máxima de gas necesario para que un motor de combustión interna pueda funcionar correctamente. Esto se hace fácilmente teniendo en cuenta el volumen del cilindro, el número de revoluciones por minuto, la eficiencia volumétrica de un motor de combustión interna acoplado al sistema y el coeficiente estequiométrico para un exceso del 10% de aire para así generar una quema más óptima dentro del M.C.I. Partiendo de esta cantidad de gas y también del valor máximo de la carga del hogar se puede calcular la superficie del estrechamiento mínimo y el diámetro de la garganta.

**3.4.1. Características del motor de combustión interna.** En el mercado actual la empresa ALL POWER LABS PERSONAL SCALE POWER, ofrece al mercado

un grupo electrógeno conformado por gasificador, motor de combustión interna (diseñado para funcionar con gas natural), generador y un sistema de control que relaciona los equipos nombrados anteriormente, ALL POWER LABS diseña gasificadores para alimentar dos tipos de motores , el primero es marca KUBOTA, el cual entrega una potencia promedio en el eje de 17.6 KW (bajo especificaciones de funcionamiento dadas por el fabricante) y es la referencia usada para el diseño del gasificador que se propone en este proyecto de grado, el segundo es marca GENERAL MOTORS y sus capacidades de entrega de potencia son mayores a las del motor KUBOTA, a continuación se observan las características del motor KUBOTA.

NATURAL GAS ENGINE, KUBOTA DG SERIES, DG972-E2

Figura 20. Curva de rendimiento del motor Kubota DG972-E2.



Fuente: [www.kubotaengine.com](http://www.kubotaengine.com)

Tabla 3. Especificaciones generales del motor Kubota DG972-E2.

<b>Model</b>		<b>DG972-E2</b>
<b>Emission Regulation</b>		<b>Tier 2</b>
<b>Type</b>		<b>Vertical 4-cycle Liquid Cooled Natural Gas</b>
<b>Number of Cylinders</b>		<b>3</b>
<b>Bore</b>	<b>mm (In)</b>	<b>74.5 (2.93)</b>
<b>Stroke</b>	<b>mm (In)</b>	<b>73.6 (2.9)</b>
<b>Displacement</b>	<b>L (cu.In)</b>	<b>0.962 (58.70)</b>
<b>Fuel</b>		<b>Natural Gas</b>
<b>Intake System</b>		<b>Naturally Aspirated</b>
<b>Maximum Speed</b>	<b>rpm</b>	<b>3600</b>
<b>Output: Net Intermittent</b>	<b>kW</b>	<b>17.6</b>
	<b>hp</b>	<b>23.6</b>
	<b>ps</b>	<b>23.9</b>
<b>Direction of Rotation</b>		<b>Counterclockwise Viewed on Flywheel</b>
<b>Oil Pan Capacity</b>	<b>L (gal)</b>	<b>3.7 (0.98)</b>
<b>Starter Capacity</b>	<b>V-kW</b>	<b>12-1.0</b>
<b>Alternator Capacity</b>	<b>V-A</b>	<b>12-40</b>
<b>Length</b>	<b>mm (In)</b>	<b>525.5 (20.69)*<sup>1</sup> / 452.5 (17.81)*<sup>2</sup></b>
<b>Width</b>	<b>mm (In)</b>	<b>415.4 (16.35)</b>
<b>Height (1)</b>	<b>mm (In)</b>	<b>502.5 (19.78)</b>
<b>Height (2)</b>	<b>mm (In)</b>	<b>159.0 (6.26)</b>
<b>Dry Weight</b>	<b>kg (lb)</b>	<b>72.0 (158.7)*<sup>1</sup> / 95.4 (210.3)*<sup>2</sup></b>

Fuente: [www.kubotaengine.com](http://www.kubotaengine.com)

**3.4.2. Calculo del máximo caudal de mezcla (aire / gas pobre) a ser consumido por el motor.** Los datos necesarios para determinar la entrada

máxima de mezcla (aire/gas pobre) al motor se resume en conocer la cilindrada (D), este valor se introduce en la siguiente ecuación.

$$\text{Entrada máx. de mezcla} \frac{\text{aire}}{\text{gas}} = \frac{1}{2} * (\text{rpm}) * D * \frac{1}{60 * 1000} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Las unidades de la cilindrada están en litros; para el motor Kubota se tiene una cilindrada de 0.962 litros y aplicando a la ecuación anterior se tiene que:

$$\text{Entrada máx. de mezcla} \frac{\text{aire}}{\text{gas}} = \frac{1}{2} * (3600[\text{rpm}]) * (0.962[\text{litros}]) * \frac{1}{(60 * 1000)}$$

$$\text{Entrada máx. de mezcla} \frac{\text{aire}}{\text{gas}} = 0.0288 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

**3.4.3. Coeficiente estequiométrico (aire/gas pobre) para un exceso del 10% de aire en la mezcla para la determinación del máximo caudal de gas pobre a producir para alimentar al motor.** El coeficiente estequiométrico es un número que se pone delante de cada especie química e indica la PROPORCIÓN en que esta especie se involucra en la reacción. El criterio determinado en el libro Wood Gas as Engine Fuel para llevar a cabo una buena combustión del gas pobre dentro del motor de combustión interna es introducir 110% de aire teórico o 10% de exceso de aire, teniendo esto en cuenta la PROPORCIÓN es 1.1 (110% de aire teórico) de aire contra la unidad (1.0) de gas pobre, esto da una relación estequiométrica Aire / Gas pobre así: 1.1: 1.0, donde la fracción de gas pobre se determina con la siguiente relación de volúmenes : (1.0/2.1) ≡ (Volumen de gas pobre/Volumen de mezcla, aire + gas pobre).

Entonces el máximo caudal de gas a generar está dado por la siguiente relación:

$$\text{Caudal máx. gas} = \text{Relación estequiométrica} * \text{Entrada máx. de mezcla} \left( \frac{\text{aire}}{\text{gas}} \right)$$

$$\text{Caudal máx. gas} = \left(\frac{1.0}{2.1}\right) * 0.029$$

$$\text{Caudal máx. gas} = 0.014 \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

**3.4.4. Eficiencia volumétrica para determinar el caudal real de gas pobre a ser consumido por el motor.** La eficiencia volumétrica es la efectividad que puede alcanzar un motor en el llenado del cilindro así como en la salida de los gases producto de la combustión, es decir, que la misma se encuentra asociada principalmente a los sistemas de alimentación y de escape, los cuales son determinantes en buena medida de la potencia a generar.

La eficiencia volumétrica del motor está en función de:

- rpm del motor.
- Diseño de entrada de aire al motor.
- Suciedad del sistema de entrada de aire al motor.

Esta tesis trabaja con una eficiencia volumétrica del 80% [3], para este valor de eficiencia se calcula el siguiente caudal de gases a generar por el gasificador:

$$\text{Entrada real de gas} = \text{Caudal máx. de gas} * \text{Eficiencia volumétrica}$$

$$\text{Entrada real de gas} = 0.014 \left[\frac{m^3}{s}\right] * 0.8$$

$$\text{Entrada real de gas} = 0.0112[m^3/s]$$

Entonces, teóricamente se determina que el gasificador genera aproximadamente un caudal de 0.0112 [m<sup>3</sup>/s] ≅ 40 [m<sup>3</sup>/h].

### **3.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA TÉRMICA DE LA CORRIENTE HALLADA DE GAS POBRE.**

Para determinar la potencia térmica de una corriente de gas combustible es necesario conocer el poder calorífico inferior (PCI) de dicho gas combustible, para este caso se tomó el valor de 4400 KJ de energía térmica por metro cúbico de gas combustible, para este valor de (PCI) se tiene una potencia térmica de:

$$Pot. Térmica del gas = Caudal real de gas pobre * PCI del gas pobre$$

$$Pot. Térmica del gas = 0.0112[m^3/s] * 4400[Kj/m^3]$$

$$Pot. Térmica del gas = 49.28 [KW]$$

### **3.6. EFICIENCIA MECÁNICA DEL MOTOR PARA EL CÁLCULO DE LA MÁXIMA POTENCIA MECÁNICA EN EL EJE. [3]**

La eficiencia mecánica del motor depende en parte del índice de compresión del motor, la eficiencia mecánica usada en esta tesis es del 28% [3].

Por lo tanto, la producción máxima de potencia mecánica en este motor es:

$$Pot. Mecánica = Pot. Térmica del gas * Eficiencia mecánica$$

$$Pot. Mecánica = 49.28[KW] * 0.28$$

$$Pot. Mecánica = 13.8 [KW]$$

### **3.7. CALCULO DE LA MÁXIMA POTENCIA ELECTRICA A GENERAR.**

La potencia eléctrica a generar está en función de la eficiencia del generador que recibe la potencia mecánica del motor de combustión interna, para una eficiencia del generador del 80% [3] se tiene:

Por lo tanto la máxima potencia eléctrica teórica será:

$$Pot. eléctrica = Pot. Mecánica * Eficiencia del generador eléctrico$$

$$Pot. eléctrica = 13.8 [KW] * 0.8$$

$$Pot. eléctrica = 11 [KW]$$

Se tiene una producción máxima teórica de 11 [KW] eléctricos.

### **3.8. DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE CORRIENTE DESCENDENTE O TIRO INVERTIDO.**

El dimensionamiento del gasificador Imbert está estrechamente relacionado con los conceptos de **eficiencia del gasificador** y **carga del hogar**, conceptos que se desarrollan más adelante en esta sección, también se muestran las gráficas (Normas) que relacionan el diámetro de garganta del gasificador (Sección más estrecha del gasificador) con el diámetro de la cámara de combustión, la altura de la tubería de ingreso de aire que define la zona de combustión y demás dimensiones que definen el Diseño del gasificador tipo Imbert.

**3.8.1. Eficiencia térmica del gasificador.** Este numeral tiene como objetivo determinar el flujo másico teórico que consumirá el gasificador, esto basado en el concepto de eficiencia. [6] En física, la eficiencia o rendimiento de un proceso o de un dispositivo es la relación entre la energía útil y la energía invertida.

$$Eficiencia térmica del gasificador = \frac{(Lo\ que\ se\ obtiene\ del\ gasificador)}{(Lo\ que\ consume\ el\ gasificador)}$$

$$Lo\ que\ se\ obtiene\ del\ gasificador = Potencia\ Térmica$$

$$Lo\ que\ consume\ el\ gasificador = Flujo\ másico\ de\ biomasa\ que\ cuenta\ con\ un\ PCI$$

*Lo que consume el gasificador = Flujo másico de biomasa \* PCI de la biomasa*

Se asume una eficiencia térmica del 70% [3], entonces:

Lo que consume el gasificador es =  $49.28 \text{ [KW]}/0.7 \cong 70 \text{ [KW]}$

Del Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia se ha tomado el valor del PCI de la biomasa residual forestal (Poda), el cual es:  $15792.6 \text{ [KJ/Kg]}$ , luego se tendrá un consumo másico de biomasa de:

$$\dot{m} \text{ de biomasa} = \frac{70 \text{ [KW]}}{15793 \text{ [KJ/Kg]}} = 0.00443 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] \cong 16 \text{ [Kg/hora]}$$

La siguiente relación expresa el consumo de biomasa residual forestal utilizada para obtener un kilovatio hora de energía.

$$\frac{16 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \right]}{11 \text{ [KW]}} = 1.45 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{KW*hora}} \right]$$

**3.8.2. Carga del hogar.** [3] La carga del hogar (Bg) se define como la cantidad de gas pobre reducida a condiciones normales de presión y temperatura, dividida por el área de la superficie de la "garganta" (Bs) en la circunferencia mínima, y se suele expresar en  $[\text{m}^3/\text{cm}^2/\text{h}]$ . Por otra parte, la carga del hogar puede expresarse como la cantidad de combustible seco consumido, dividida por el área de la superficie del estrechamiento más angosto (Bs), en cuyo caso, la carga del hogar se expresa en  $[\text{kg}/\text{cm}^2/\text{h}]$ .

$$\text{Carga del hogar (Bg)} = \frac{\text{Caudal de gas pobre reducido} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right]}{\text{Área de la superficie de la garganta} [\text{cm}^2]}$$

$$\text{Carga del hogar (Bg)} = \frac{\text{Flujo másico de combustible seco consumido} \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \right]}{\text{Área de la superficie de la garganta} [\text{cm}^2]}$$

De acuerdo con la información dada por el libro *Wood Gas as Engine Fuel*, la carga del hogar (Bg) puede alcanzar un valor máximo próximo a unos 0,9, lo cual implica una superficie del estrechamiento más angosto "garganta" (Bs) de 0,36 en funcionamiento continuo en buenos gasificadores de tipo "Imbert". Valores superiores de carga del hogar (Bg) dan lugar a unas caídas extremas de presión en la zona de reducción del equipo.

Como un kilogramo de combustible seco, en circunstancias normales, produce alrededor de 2,5 m<sup>3</sup> de gas pobre, la relación entre la carga del hogar (Bg) y el área de garganta (Bs) viene dada por:

$$\text{Carga del hogar (Bg)} = 2.5 * \text{Área de garganta (Bs)}$$

Los valores mínimos de carga del hogar (Bg) dependen fundamentalmente del termoaislamiento de la zona caliente. Por debajo de una cierta carga del hogar la temperatura en la zona caliente se reduce tanto que resulta inevitable la producción de alquitrán.

Retomando la definición de carga del hogar y teniendo en cuenta el valor máximo que puede tomar la carga del hogar se tendrá:

$$Bg \text{ máx.} = 0.9 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{cm}^2 * \text{hora}} \right] = \frac{\text{Caudal de gas pobre reducido}}{\text{Superficie de garganta}}$$

$$Bg \text{ máx.} = 0.9 = \frac{(0.0112 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] * 3600)}{S}$$

Dónde:

S = Superficie de la garganta

Entonces el valor de la superficie de la garganta será:

$S \cong 45$  [cm<sup>2</sup>]; dicha superficie es circular y se tendrá un diámetro de garganta de:

**dt = diámetro de garganta  $\cong 8$  [cm]**

Con base en el valor del diámetro de garganta determinado anteriormente, se aplica dicho valor a las normas suecas para la determinación de las otras dimensiones que definen el gasificador. Antes es necesario determinar el tipo de gasificador.

**3.8.3. Principales dimensiones de los gasificadores de tipo normal (Imbert) para astillas de madera.** En la figura 21 se presentan las principales dimensiones de gasificadores tipo Imbert para cada tipo de gasificador, en esta figura se puede observar que se han definido tres tipos de gasificadores, los cuales se identifican con las referencias F3, F5 y F7, donde el tipo F3 presenta el valor del diámetro del hogar más pequeño, 31 centímetros, y el tipo F7 presenta el máximo valor del diámetro del hogar, 43 centímetros.

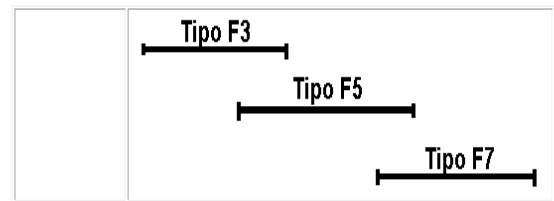
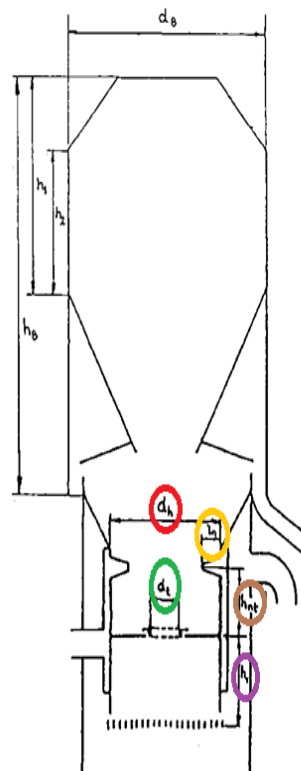
Cada tipo de gasificador mantiene constante el diámetro del hogar y se hacen cuatro variaciones del diámetro de garganta, definiendo así la geometría para cada tipo de gasificador.

Para el tipo de gasificador F3, se tiene un rango de diámetros de garganta de 6 a 12 centímetros; se cuenta con un diámetro de garganta de 8 centímetros; para dicho tipo de gasificador (F3) y para el diámetro de garganta determinado en 8 centímetros se definen las siguientes dimensiones del gasificador: Altura de las toberas que inyectan el aire en el gasificador (12.5 [cm.]), altura de la cámara de reducción (16.5 [cm.]) y longitud de penetración de las toberas de inyección de aire en el gasificador (5 [cm.]), valores que serán ratificados más adelante en esta

sección cuando se introduzca el valor del diámetro de garganta en las respectivas normas (gráficas).

Figura 21. Principales dimensiones de los gasificadores de tipo normal para astillas de madera.

Tipos de gasificadores	Principales dimensiones del hogar y de las zonas de reducción							Producción de gas Nm <sup>3</sup> /h		Consumo de madera con carga máxima kg/h
	$d_h$	$d_t$	$h_{nt}$	$h_r$	$n$	$d_n$	$l_n$	Máx.	Mín.	
F-3	310	60	115	175	6	7,0	50	25	4	12
60-120	310	80	125	165	6	8,0	50	50	6	25
F-300	310	100	135	155	6	9,5	40	90	8	35
60/120	310	120	145	145	6	11,5	40	115	12	50
F-5	370	80	125	205	7	9,0	60	60	7	25
80/150	370	100	135	195	7	10,0	60	80	10	35
F-500	370	125	145	185	7	11,0	50	120	13	55
80/150	370	150	155	175	7	12,0	50	165	18	75
F-7	430	110	140	275	9	9,5	70	105	13	50
110-180	430	130	150	265	9	10,5	70	135	17	60
F-700	430	155	160	255	9	12,0	50	170	22	80
110-180	430	180	170	245	9	14,0	50	220	28	100

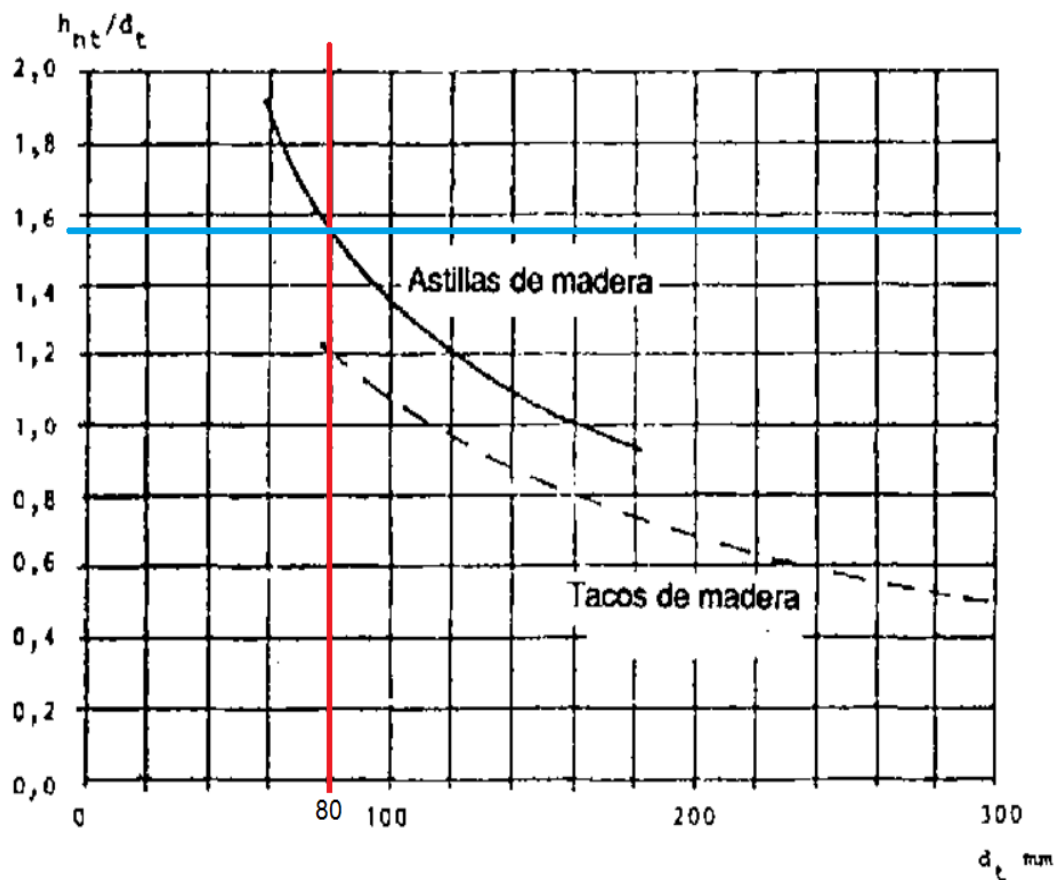


- Diámetro de la Cámara de Combustión
- Diámetro de garganta
- Altura de las toberas que inyectan el aire en el gasificador
- Altura de la Cámara de Reducción
- Longitud de penetración de las toberas de inyección de aire en el gasificador

Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

**3.8.4. Altura del plano de los inyectores sobre la garganta,  $h_{nt}$ , en función del diámetro de la garganta ( $d_t$ ).** Las normas que han relacionado los diferentes parámetros del gasificador tipo Imbert se expresan en forma de gráfica, al hacer las correspondientes intersecciones en la gráfica (norma) se establece la altura a la cual deben estar los tubos que inyectan el aire para así definir la zona de combustión en el gasificador, esta altura está en función del diámetro de garganta determinado en el numeral 3.8.2.

Figura 22. Altura del plano de los inyectores sobre la garganta,  $h_{nt}$ , en función del diámetro de la garganta ( $d_t$ ).



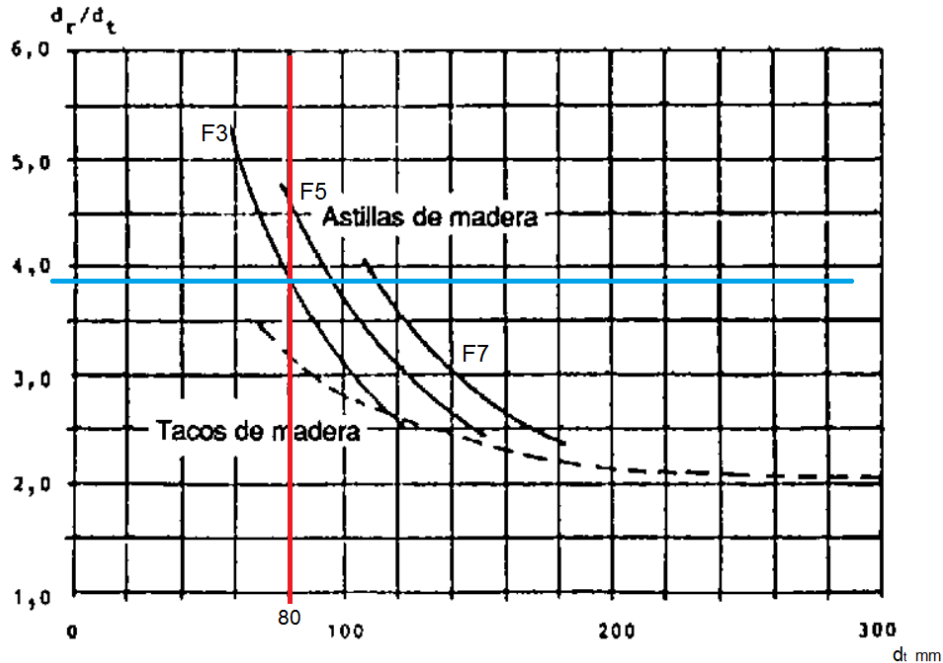
Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

La relación (altura de inyección de aire / diámetro de garganta) entrega el siguiente valor:  $h_{nt} / d_t = 1.55$

Para la relación mostrada anteriormente y para el diámetro de garganta ( $d_t$ ) de 8 [cm], se determina una altura de ingreso de aire de:  **$h_{nt} = 12.4$  [cm].**

**3.8.5. Diámetro del hogar,  $d_r$ , en función del diámetro de garganta ( $d_t$ ).** Esta norma establece el diámetro que he de tener la cámara de combustión a la altura en la cual se inyecta el aire, y como la cámara de combustión es una cámara de combustión en V, esta norma también estará determinando el ángulo de la cámara de combustión.

Figura 23. Diámetro del hogar,  $d_r$ , en función del diámetro de garganta ( $d_t$ ).



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

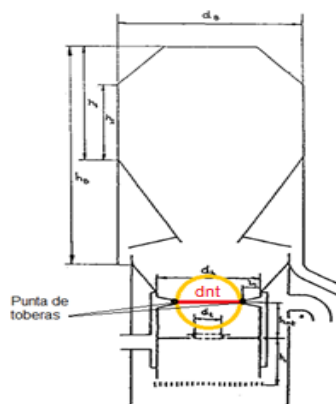
Como indica en el numeral 3.8.3., el gasificador diseñado en esta tesis es Tipo F3, para esta clasificación la relación entre el diámetro del hogar y el diámetro de garganta es:

$$d_r / d_t \cong 3.875$$

La relación anterior nos proporciona un **diámetro del hogar de: 31 [cm]**.

**3.8.6. Diámetro del anillo de las puntas de las toberas,  $d_{nt}$ , en función del diámetro de garganta,  $d_t$ .** En la figura 24 se ve el diámetro que esta norma establece, en la figura 25 se indica cómo esta norma define una zona de combustión con llama o reacción en cadena no inhibida, y una zona de combustión sin llama (incandescente) o reacción en cadena inexistente. Este numeral termina mostrando la figura 26, la cual establece la relación entre el diámetro a determinar ( $d_{nt}$ ) y el diámetro de garganta.

Figura 24. Diámetro del anillo que forman los extremos de las toberas que inyectan el aire al gasificador.



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

En la figura 24 se puede observar que el diámetro a determinar ( $ddh$ ) se define por la profundidad a la cual ingresan las toberas que inyectan el aire dentro de la cámara de combustión.

Figura 25. Combustión con llama y combustión sin llama en la cámara de combustión.

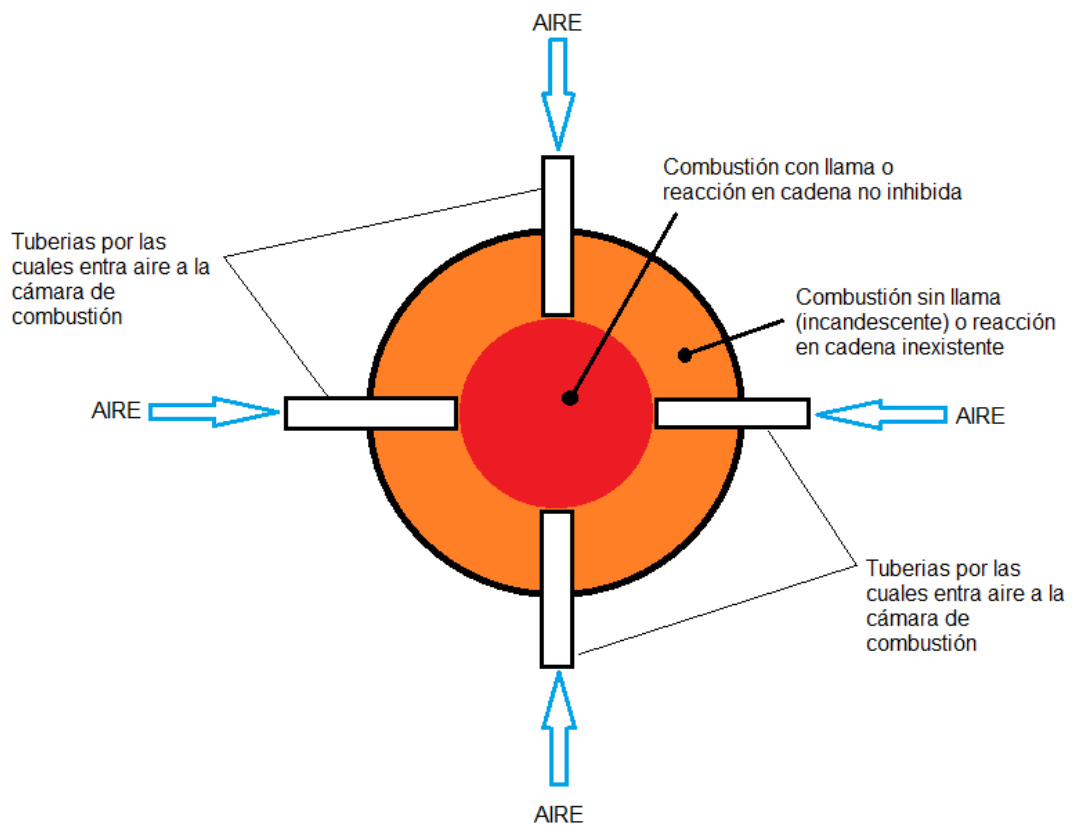
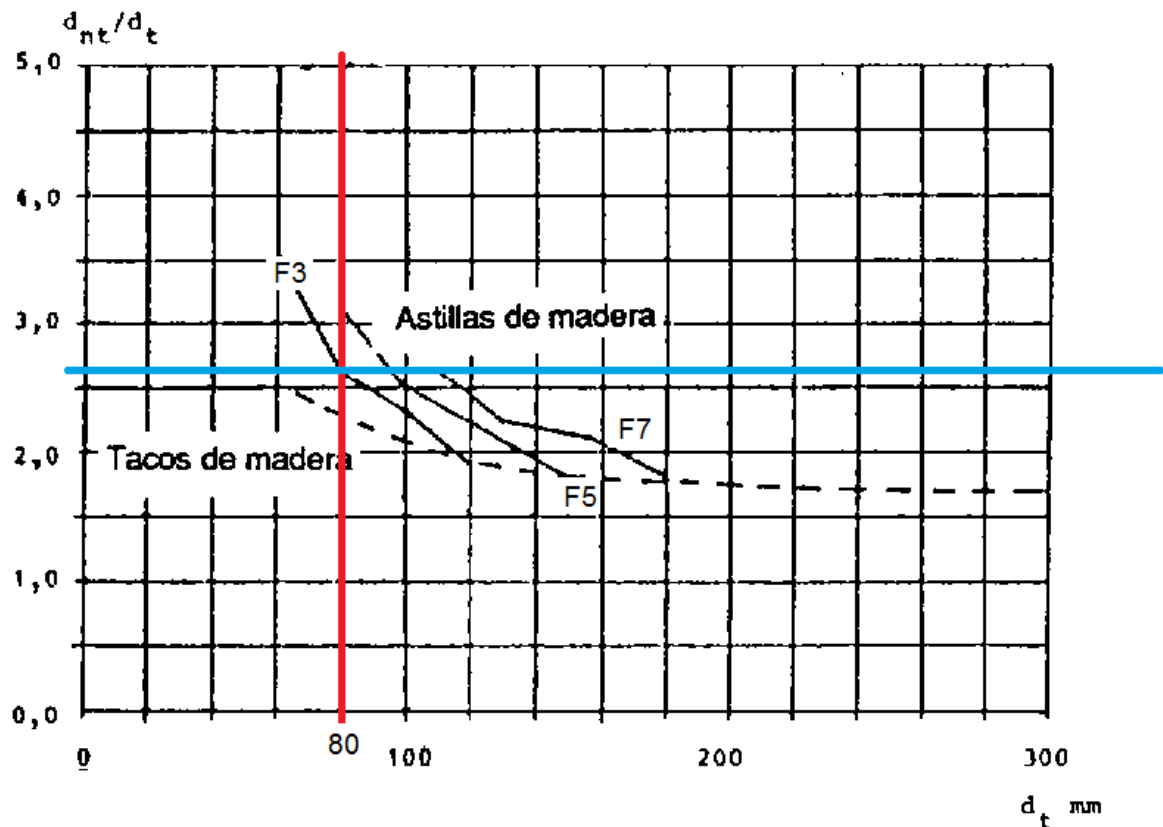


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

La figura 25 muestra la vista superior de un gasificador tipo Imbert a nivel de la entrada de aire, en esta figura se observan cuatro tuberías por las cuales ingresa el aire y genera una combustión completa de la biomasa que ingresa a esta zona,

en la periferia se define una zona de combustión sin llama o incandescente, esto debido a que en esta zona no llega oxígeno proveniente del aire que alimenta al gasificador.

Figura 26. Diámetro del anillo de las puntas de las toberas,  $d_{nt}$ , en función del diámetro de garganta,  $d_t$ .



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

Para un gasificador Tipo F3, la relación entre el diámetro del anillo de las puntas de las toberas y el diámetro de garganta de 80 [mm] da la relación:

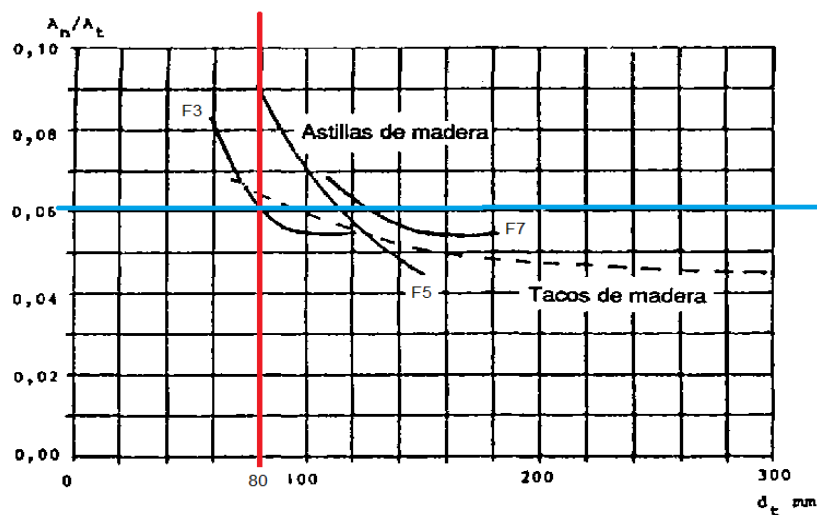
$$d_{nt}/d_t \cong 2.625$$

La relación anterior da un **diámetro del anillo de las puntas de las toberas de: 21[cm]**.

Esta norma no es aplicable a gasificadores con entrada central de aire.

**3.8.7. Relación entre la superficie de salida de la tobera,  $A_n$ , y la superficie de la garganta,  $A_t$ , en función del diámetro de garganta.** En este numeral lo que se pretende es determinar el diámetro de los tubos por los cuales se ingresa el aire a la cámara de combustión.

Figura 27. Relación entre la superficie total de las toberas y la superficie de garganta.



Fuente: Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, 1986.

$A_n$  = Superficie total de las toberas.

$A_t$  = Superficie de la garganta del gasificador.

$Nt$  = Número de toberas con las cuales va equipado el gasificador.

$dn$  = Diámetro de una sola tobera.

La relación entre el área total de las toberas y el área de la garganta del gasificador está dada así:

$\frac{An}{At} = C$  ; El valor  $C$  es determinado en la figura 27 (norma) que está en función del diámetro de garganta y del tipo de gasificador, este gasificador es Tipo F3 , con lo cual se establece un valor  $C$  aproximado de: 0.06

Entonces la superficie total de las toberas será:

$$An = \pi(dn)^2 * Nt * \frac{1}{4}$$

Y el área de garganta está dado por:

$$At = \pi(dt)^2 * \frac{1}{4}$$

Al realizar la siguiente división  $\frac{An}{At} = C$  determinaremos el diámetro de tobera, que estará dado así:

$$dn = \sqrt{C * dt^2 * \left(\frac{1}{Nt}\right)}$$

En este diseño se ha decidido que el gasificador cuente únicamente con un tubo de ingreso de aire, dicho tubo va centrado he ingresa por la parte superior del gasificador hasta la zona de combustión, entonces el valor de  $Nt$ (número de tubos) será igual a 1, para este valor de número de toberas con las cuales va equipado el gasificador y sabiendo que el diámetro de garganta es de 80 [mm], se tiene un valor del diámetro de la tubería de ingreso de aire de:

$$dn \cong 20 [mm]$$

### 3.9. FORMA DEFINIDA DEL DISEÑO A CONSTRUIR.

En la figura 28 se muestra un corte longitudinal del gasificador a construir, aquí se identifican la cámara de combustión/reducción, la entrada central de aire y demás elementos que definen el gasificador.

Figura 28. Forma definida del diseño a construir.

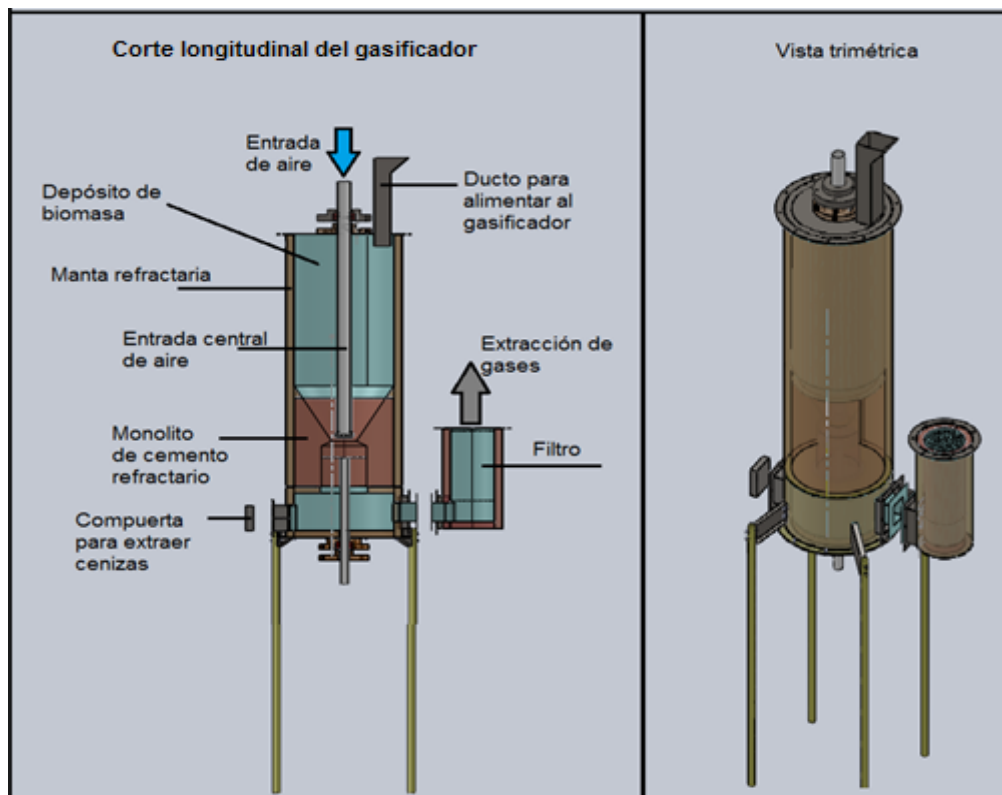


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado

**3.9.1. Altura del plano de los inyectores sobre la garganta,  $h_{nt}$ , en función del diámetro de garganta ( $d_t$ ).** El valor determinado bajo las normas para esta altura fue de 12.5 centímetros, en la siguiente figura se ve que la forma definida del diseño permite variar esta altura.

Figura 29. Altura entre la entrada de aire y la garganta.

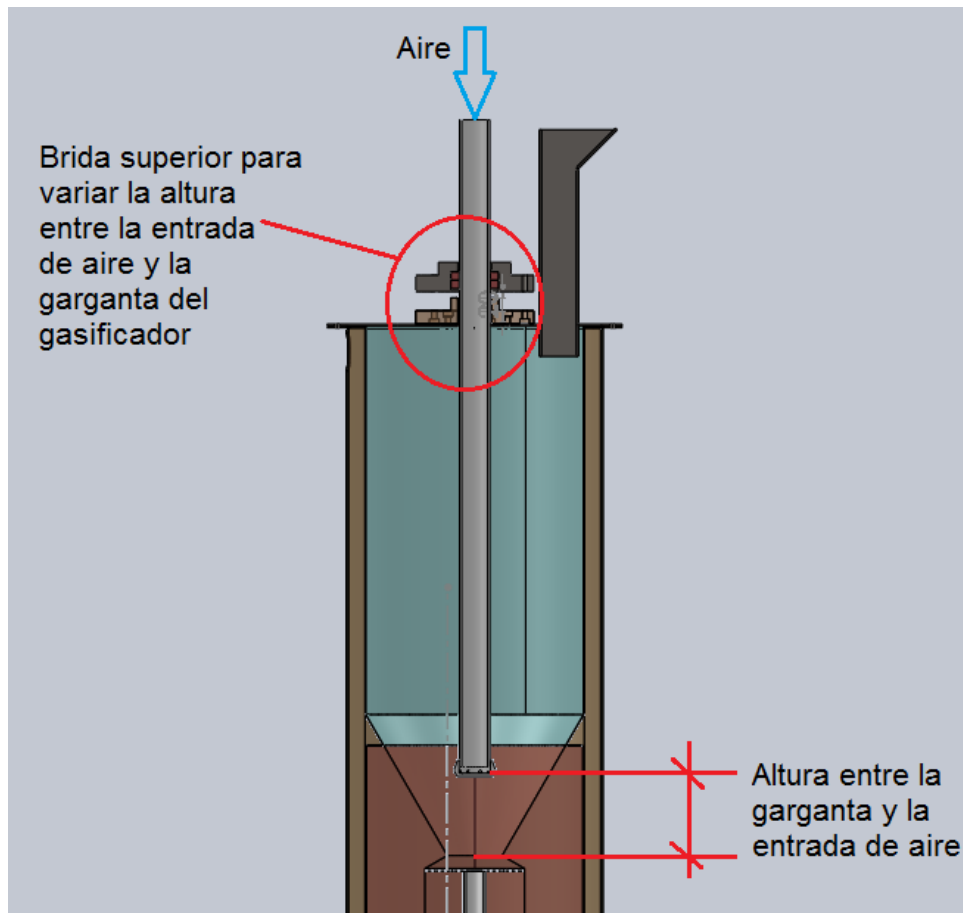
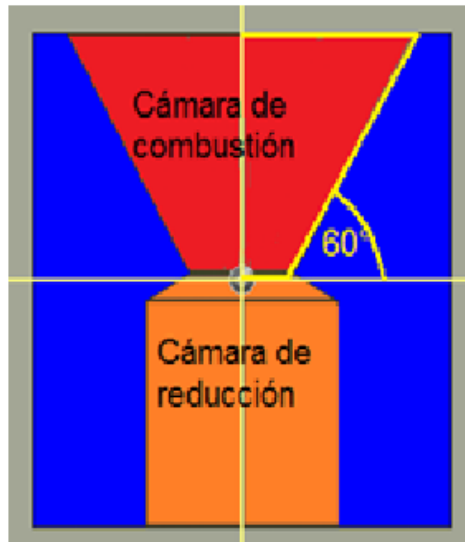


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

**3.9.2. Diámetro y ángulo de la cámara de combustión.** El diámetro determinado por las normas fue de 31 centímetros, además la inclinación de la garganta debe estar entre los  $45^\circ$  y  $60^\circ$  (Norma) [3], para estas dos condiciones se definieron las siguientes dimensiones para la cámara de combustión/reducción.

Figura 30. Dimensiones definidas para la cámara de combustión/reducción.

Corte transversal de la cámara de combustión / reducción



Vista trimétrica

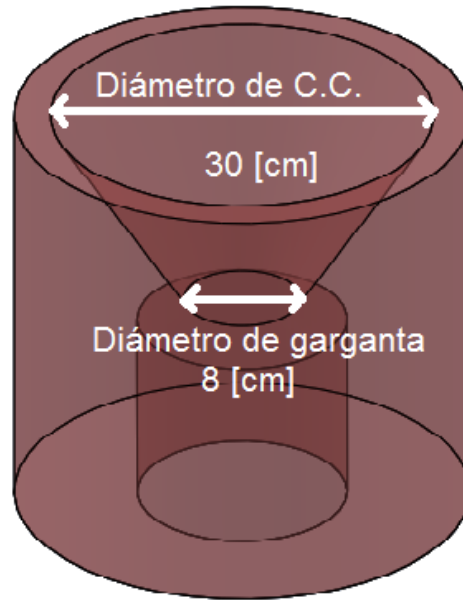
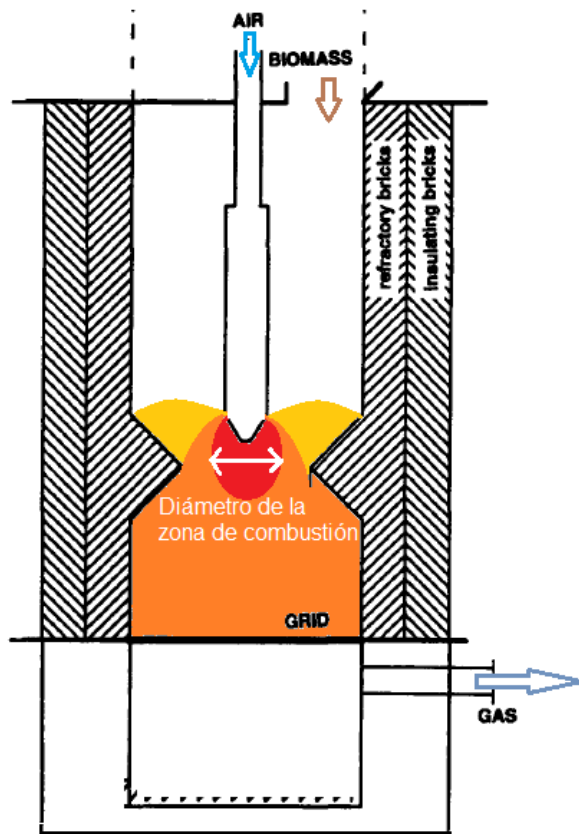


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

Para este diseño se decidió que el ángulo de la cámara de combustión fuera de 60° para que las astillas de madera (residuo forestal) fluyan mejor.

**3.9.3. Diámetro del anillo de las puntas de las toberas,  $d_{nt}$ , en función del diámetro de garganta,  $d_t$ .** Este diseño tiene única entrada central de aire, para este tipo de suministro de aire no se define el diámetro entre puntas de toberas, en la figura 31 se observa que dicho diámetro lo que busca es definir una zona netamente de combustión.

Figura 31. Diámetro de la zona de combustión.



Fuente: Pedro Garcia-Bacaicoa, Rafael Bilbao, Jesús Arauzo & M. Luisa Salvador.(Figura modificada).

Como se puede observar, este diámetro de la zona de combustión será definido por la forma en que ingrese el aire (boquilla) a la zona de combustión, además el tamaño de esta zona está influenciado por el caudal de aire que ingrese y por la granulometría de la biomasa.

**3.9.4. Relación entre la superficie de salida de la tobera,  $A_n$ , y la superficie de la garganta,  $A_t$ , en función del diámetro de garganta. El diámetro de la**

tubería central de aire determinado con las normas fue de 20 milímetros, para definir el diseño se decidió que la tubería debía tener aproximadamente 2.5 veces más área que la teórica máxima determinada. La incertidumbre que genera el criterio utilizado anteriormente se elimina cuando se determine la altura entre la entrada de aire y la garganta, ya que se tendrá un ingreso de aire adecuado para que se definan correctamente las zonas de combustión, reducción y pirólisis dentro del gasificador, mejorando así el proceso de gasificación.

Figura 32. Diámetro máximo teórico y diámetro utilizado.

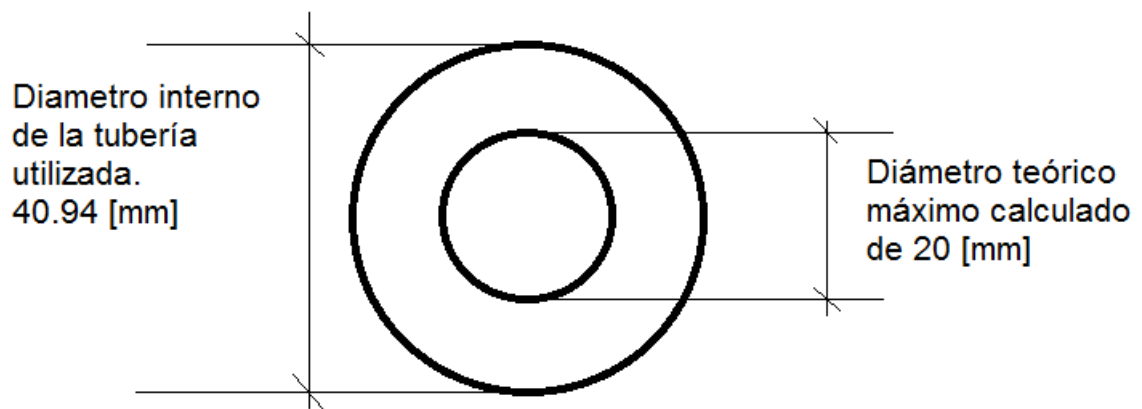


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

Las características que definen el tubo de ingreso de aire son:

Diámetro nominal =  $1\frac{1}{2}$ "

Diámetro exterior = 1.9 [in]; 48.3 [mm]

Espesor de la tubería = 3.68 [mm]

SCH = 40

**3.9.5. Altura entre la rejilla que define el volumen de la cámara de reducción y la garganta.** Según la figura 21, para un gasificador Tipo F3 con un diámetro de garganta de 8 centímetros, se define la altura entre la garganta y la rejilla que define la cámara de reducción en 16,5 centímetros (norma). En la figura 33 se puede observar que la forma definida del diseño permite variar esta altura.

Figura 33. Altura entre la garganta y la rejilla que define el volumen de la cámara de reducción.

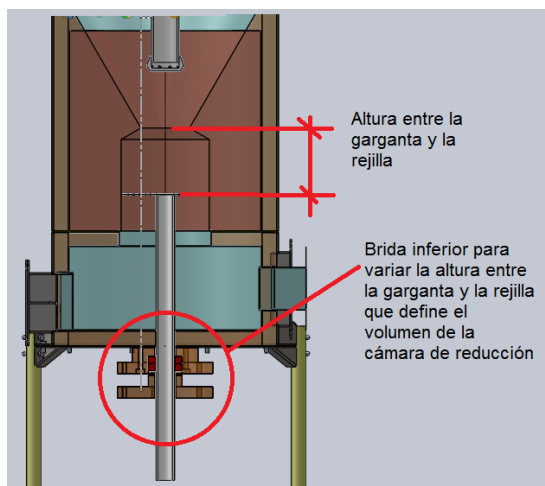


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

## 4. DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS.

En este capítulo se describen las pruebas que se llevaron a cabo con el gasificador y con el gas pobre producido, el objetivo principal de las pruebas hechas con el gasificador fue la obtención de gas pobre, y el objetivo principal de las pruebas hechas al gas pobre fue la determinación del comportamiento del gasificador.

### 4.1. PRUEBAS HECHAS EN EL GASIFICADOR.

En la figura 34 se observan las bridas que permitieron variar dos parámetros importantes.

Figura 34. Bridas superior e inferior, entrada de aire y rejilla.

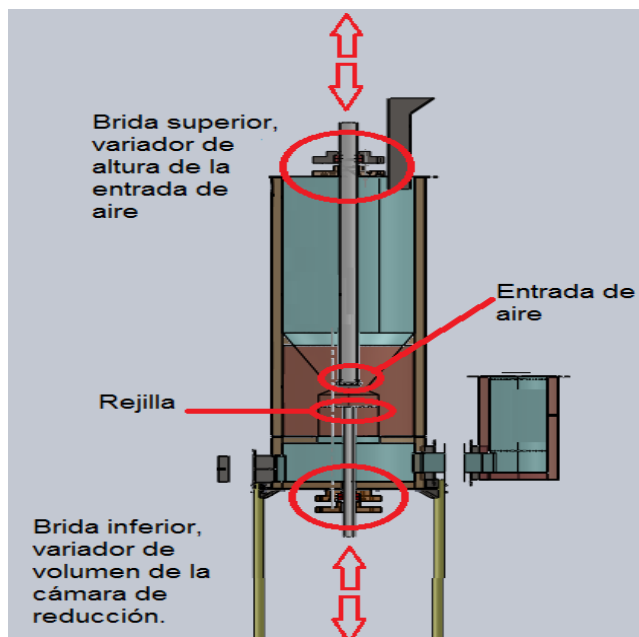


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

El primer parámetro a variar fue el volumen de la cámara de reducción, en la figura 34 se puede ver la brida inferior, el objetivo de esta brida es permitir un movimiento lineal de la rejilla, definiendo así un volumen mínimo (posición de la rejilla: parte superior de la cámara de reducción) y un volumen máximo de dicha recámara (posición de la rejilla: parte inferior de la cámara de reducción).

El objetivo de la brida superior es variar la distancia entre la garganta del gasificador y la entrada de aire.

#### **4.1.1. Metodología usada en las pruebas del gasificador.**

a) Mantener el volumen de la cámara de reducción en la posición que dicta el máximo volumen de dicha cámara, luego se varia la altura de la entrada de aire desde una longitud mínima de 5 centímetros hasta una longitud máxima de 20 centímetros, en dicho proceso se mantiene un piloto a la salida de los gases y el éxito de la prueba se visualiza si el gas extraído del gasificador genera reacción química de combustión.

b) Se repite el proceso descrito anteriormente, solo que ahora el volumen de la cámara de reducción es mínimo. En la figura 35 se observan las posiciones máxima y mínima de la cámara de reducción.

Tabla 4. Metodología usada en las pruebas del gasificador.

Volumen de la C.R.		Distancia entre la entrada de aire y la garganta [cm]	Combustión del gas	
			SI	NO
Máx.	Mín.			
		5		
		6		
		7		
		8		
		9		
		10		

Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

Figura 35. Posiciones máxima y mínima de la cámara de reducción.

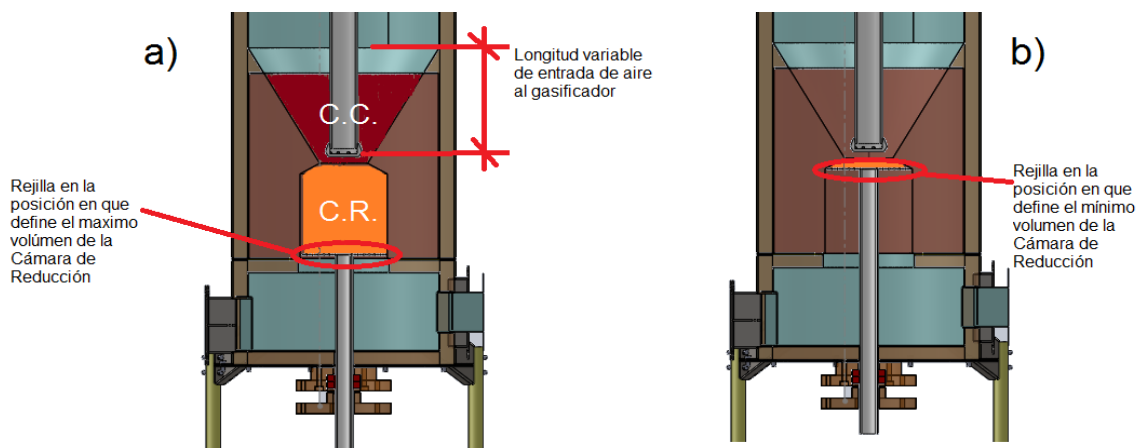


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

En la tabla 4 se resume el método utilizado en las pruebas realizadas con el gasificador.

**4.1.2. Resultados obtenidos de las pruebas hechas al gasificador.** Gracias a la variación de la altura entre la garganta y la entrada de aire, se pudo gasificar dos tipos diferentes de biomasa (diferente granulometría, diferente densidad), cascarilla de arroz y astillas de madera (residuo forestal). El único factor común en el proceso de gasificación que compartieron la cascarilla y el residuo forestal para el diseño expuesto fue el valor de la cámara de reducción, el cual fue cero.

En la tabla 5 se muestran los valores para los cuales se tuvo éxito en la generación de un gas combustible para el residuo forestal que se produce en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander.

El gasificador presentó una producción de gas pobre para el rango de 12 a 17 centímetros en el valor de la distancia entre la entrada de aire y la garganta del gasificador para un volumen en la cámara de reducción de cero centímetros, pero para el valor de 15 centímetros presentó una mejor estabilidad en su comportamiento (para los 15 centímetros presenta mayor tiempo en generación continua de gas), por tanto se estableció dicha longitud en 15 centímetros.

Tabla 5. Resultados obtenidos de la gasificación del residuo forestal de la UIS.

Volumen de la C.R.		Distancia entre la entrada de aire y la garganta [cm]	Combustión del gas	
			SI	NO
Máx.	Mín.			
	X			
		5		X
		6		X
		7		X
		8		X
		9		X
		10		X
		11		X
		12	X	
		13	X	
		14	X	
		15	X	
		16	X	
		17	X	

Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

**4.1.3. Modelo termodinámico aplicado para la determinación real de la eficiencia del gasificador.** El objetivo que persigue esta sección es determinar la máxima potencia térmica que puede entregar la corriente de gas pobre, en la figura 36 se muestra el modelo a aplicar para determinar la eficiencia del gasificador.

Figura 36. Modelo para determinar la eficiencia del gasificador.

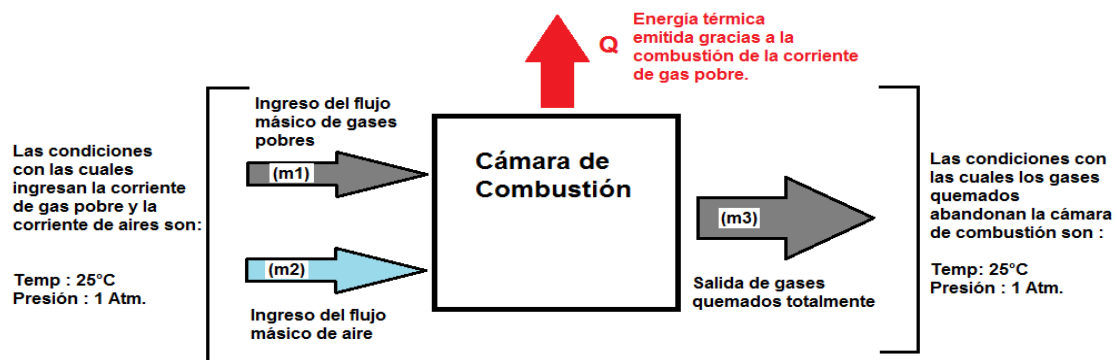


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

Para ejecutar el modelo anterior es necesario determinar los flujos másicos de gases pobres ( $\dot{m}_1$ ) y el flujo másico de aire ( $\dot{m}_2$ ), para ello se deben plantear las condiciones bajo las cuales se ejecutará el modelo descrito anteriormente.

**4.1.3.1. Condiciones bajo las cuales se ejecuta el modelo termodinámico escogido.** Las condiciones son las siguientes:

1. Se considera una combustión completa de la corriente de gas pobre durante un proceso de combustión de flujo estable donde los reactivos ingresan a la cámara de combustión a 25°C y 1 atmosfera de presión, los productos obtenidos abandonan también la cámara de combustión en

condiciones estándares de 25°C y 1 atmosfera de presión, esto con el fin de calcular la máxima cantidad de energía térmica transmitida por la reacción de combustión de la corriente de gas pobre.

2. La composición en volumen de los gases que integran la corriente de gas pobre producida por el gasificador se toma de la literatura [5], para dicha fuente se ha determinado la siguiente composición:

CO	(23%)	} Porcentaje en volumen típico de los gases combustibles y no combustibles presente en una corriente de gas pobre producida bajo el fenómeno termoquímico de la gasificación, alimentado dicho proceso con aire atmosférico.
H2	(18%)	
CH4	(1%)	
CO2	(11%)	
N2	(47%)	

3. La cantidad de aire que se utiliza para llevar a cabo la combustión de la corriente de gas pobre es la cantidad estequiométrica que requiere la composición mostrada anteriormente.
4. [5] La cantidad de aire que se utiliza para llevar a cabo el proceso de gasificación de los residuos forestales es únicamente el 30% del aire estequiométrico determinado para la quema de los residuos forestales (dicho balance estequiométrico se desarrolló en el capítulo tercero para la formula empírica que define a la madera).

**4.1.3.2. Proceso para determinar el flujo másico de gases pobres producido por el gasificador.** Para determinar el flujo másico de gases pobres ( $\dot{m}_1$ ) producidos se aplicó el siguiente balance de masa.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_b + \dot{m}_{ag} - \dot{m}_c$$

Figura 37. Balance de masa en el gasificador.

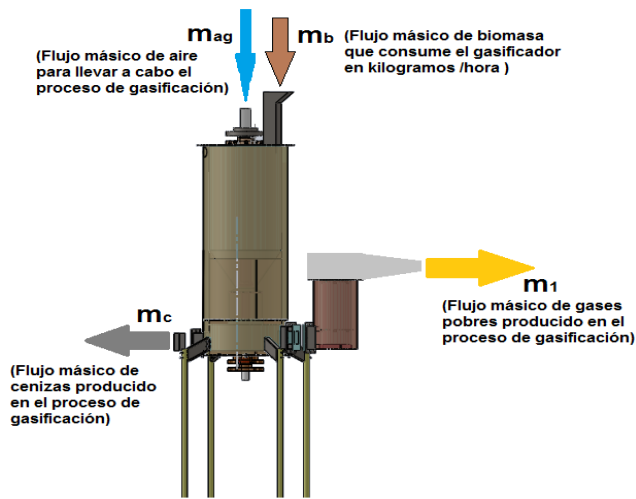


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

Dónde:

$m_1$  = Flujo másico de gases pobres producido en el proceso de gasificación, en kilogramos/ hora.

$m_b$  = Flujo másico de biomasa que consume el gasificador en kilogramos/hora.

$m_{ag}$  = Flujo másico de aire para llevar a cabo el proceso de gasificación.

$m_c$  = Flujo másico de cenizas producido en el proceso de gasificación.

Durante las pruebas realizadas se obtuvieron los siguientes valores para el flujo másico de biomasa y flujo másico de cenizas producido:

$m_b = 18$  [Kg/hora].

$m_c = 1.7$  [Kg/hora].

Para determinar la cantidad de aire que ingresó al gasificador durante una hora se procedió del siguiente modo:

1) Cálculo de la relación aire/combustible (astillas de madera) para la fórmula empírica que define a la madera, este valor se retoma del capítulo tercero donde dicho valor es de: 6.2 [kg. de aire /kg. de residuo forestal].

Pero el fenómeno termoquímico de la gasificación requiere únicamente el 30% del aire, para dicho porcentaje de aire se tendrá un valor de: 1.86 [kg. de aire/kg. de residuo forestal]. Entonces para gasificar los 18 [kilogramos de residuo forestal /hora] que ingresan al gasificador se necesita un flujo másico de aire de: 33.48 [kg. de aire/hora].

Retomando el balance de masa planteado anteriormente se tendrá un flujo másico de gases pobres producido en el proceso de gasificación de:

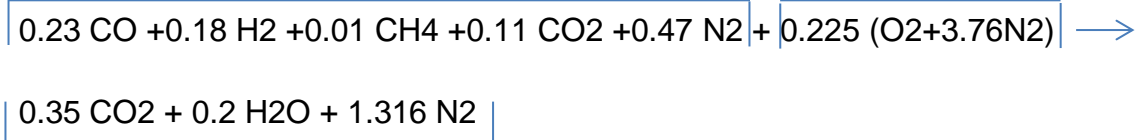
$$\dot{m}_1 = 18 + 33.48 - 1.7 = 49.78 \text{ [kg. de gases pobres /hora].}$$

**4.1.3.3. Proceso para determinar el flujo másico de aire necesario para quemar la corriente de gases pobres en el modelo termodinámico escogido.** Para determinar el flujo másico de aire estequiométrico ( $\dot{m}_2$ ) para quemar la corriente de gases pobres se procedió del siguiente modo:

1) Balance estequiométrico de un kmol. de gases pobres para la composición en volumen de gases pobres definida anteriormente, entonces el balance quedará así:

Composición en volumen de la corriente de gas pobre

Aire atmosférico



Productos obtenidos de la quema de la corriente de gas pobre

2) Determinar la relación aire /combustible (gas pobre) para el balance estequiométrico hecho anteriormente, esto es:

$$r \text{ a/c} = \frac{0.225[16*2+3.76*14*2]}{0.23(12+16)+0.18(1*2)+0.01(12+1*4)+0.11(12+16*2)+0.47(14*2)}$$

$$r \text{ a/c} = 1.23 \text{ [kg. de aire/kg. de gas pobre]}$$

Entonces para los 49.78 [kg. de gases pobres /hora] que produce el gasificador se necesitará un flujo másico de aire estequiométrico ( $\dot{m}_2$ ) para quemar la corriente de gases pobres de:

$$\dot{m}_2 = 61.22 \text{ [kg. de aire/hora].}$$

Retomando nuestro modelo tendremos los siguientes flujos másicos:

Figura 38. Flujos másicos hallados para aplicar al modelo termodinámico planteado.

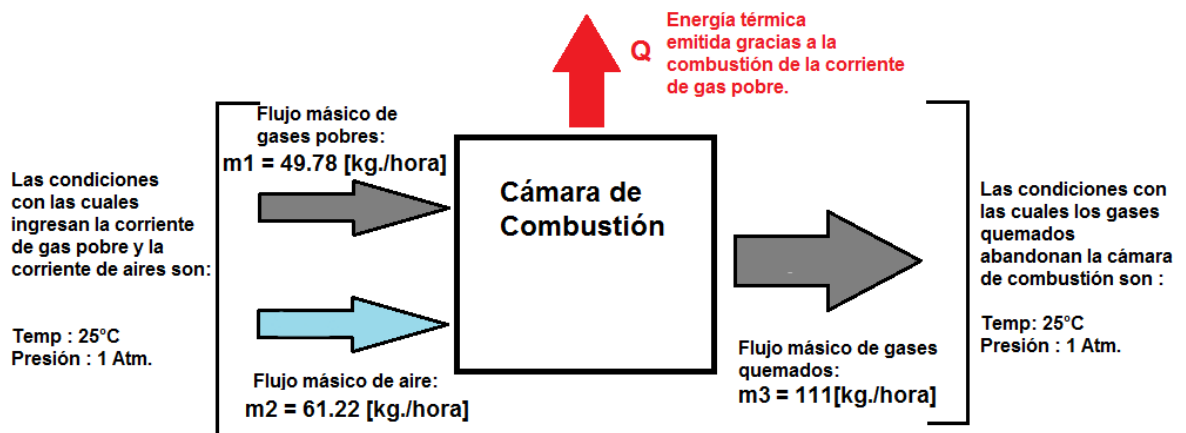


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

**4.1.3.4. Aplicación del modelo termodinámico escogido para determinar la eficiencia del gasificador.** Si se supone que los átomos de cada reactivo permanecen intactos (sin reacciones nucleares) y se ignora cualquier cambio en las energías cinética y potencial, el cambio de energía de un sistema durante una reacción química se deberá a un cambio en el estado y a un cambio en la composición química, es decir:

$$\Delta E \text{ sistema} = \Delta E \text{ estado} + \Delta E \text{ química}$$

Por consiguiente, cuando los productos formados durante una reacción química salen de la cámara de combustión en el estado de entrada de los reactivos, se tiene:

$$\Delta E \text{ estado} = 0$$

Y, en este caso, el cambio de energía del sistema se debe sólo a los cambios en su composición química.

El proceso que se lleva a cabo en el modelo no incluye interacciones de trabajo. De ese modo, de acuerdo con la relación de balance de energía para flujo estable, la transferencia de calor durante este proceso debe ser igual a la diferencia entre la entalpía de los productos y la entalpía de los reactivos, es decir:

$$Q = H \text{ productos} - H \text{ reactivos}$$

Dónde:

$$H \text{ productos} = \sum N_{\text{prod}} * hf^{\circ}, \text{ prod}$$

$$H \text{ reactivos} = \sum N_{\text{reac}} * hf^{\circ}, \text{ reac}$$

$N_{\text{prod}}$  = Numero de moles de los diferentes compuestos o elementos presentes en los productos.

$N_{\text{reac}}$  = Numero de moles de los diferentes compuestos o elementos presentes en los reactivos.

$h_f^\circ, \text{ prod}$  = Entalpía de formación de los compuestos presentes en los productos a condiciones estándar de 25°C y 1 Atm.

$h_f^\circ, \text{ reac}$  = Entalpía de formación de los compuestos presentes en los reactivos a condiciones estándar de 25°C y 1 Atm.

Se asigna a la entalpía de formación de todos los elementos estables ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{C}$ ) un valor de cero en el estado de referencia estándar de 25°C y 1 Atm, es decir:

$h_f^\circ = 0$  , para todos los elementos estables.

En la figura 39 se observan los elementos estables presentes en los flujos másicos entrantes y salientes de la cámara de combustión.

Figura 39. Elementos y moléculas presentes en los flujos másicos que alimentan la cámara de combustión.

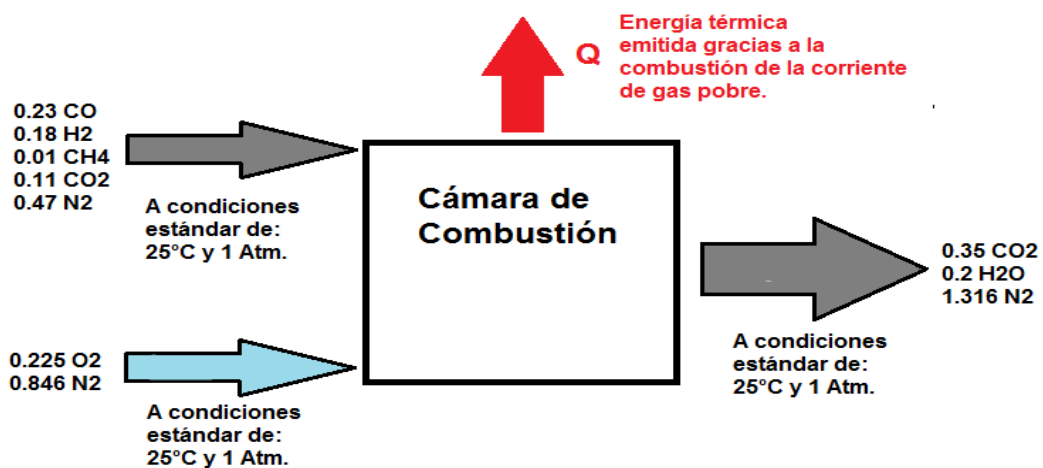


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

Entonces al ejecutar el modelo tendremos:

$$Q = H \text{ productos} - H \text{ reactivos}$$

$$Q = \sum N_{\text{prod}} * hf^{\circ}, \text{ prod} - \sum N_{\text{reac}} * hf^{\circ}, \text{ reac}$$

$$Q = (N * hf^{\circ})_{\text{CO}_2} + (N * hf^{\circ})_{\text{H}_2\text{O}} - [(N * hf^{\circ})_{\text{CO}} + (N * hf^{\circ})_{\text{CH}_4} + (N * hf^{\circ})_{\text{CO}_2}]$$

$$Q = (0.35(-393520) + 0.2(-241820)) - (0.23(-110530) + 0.01(-74850) + 0.11(-393520))$$

[Kj/kmol]

$Q = -116638.4 \text{ [Kj /kmol de gas pobre]} = - 4673.012 \text{ [kj /kg. de gas pobre]}$ ; esta es la energía que se genera por kilogramo de gas pobre quemado.

Para un flujo másico de gas pobre de 49.78 [kg. de gas pobre/hora] que ingresa a la cámara de combustión se tendrá una potencia térmica generada por la corriente de gas pobre de:

Potencia térmica generada por la combustión del gas pobre (Pot.ter. del gas):

$$\text{Pot.ter. del gas} = 4673.012[\text{kj/kg. de gas pobre}] * 49.78 [\text{kg. de gas pobre/hora}]$$

$$\text{Pot.ter. del gas} = 232622.6 [\text{kj/hora}] = 64.61 [\text{kW}]$$

Entonces la eficiencia del gasificador será:

$$\eta_{\text{Gasificador}} = \frac{\text{Potencia térmica generada por la quema de la corriente de gas pobre}}{\text{Potencia térmica que posee la biomasa}} * 100$$

El poder calorífico de la biomasa se saca del capítulo dos y sabiendo que el gasificador consume 18 kilogramos de biomasa por hora se tendrá la siguiente potencia térmica dada por la biomasa:

Pot. ter. biomasa = PCI biomasa [J/kg. de biomasa]\* Flujo másico de la biomasa [Kg/seg]

Pot. ter. biomasa = 16099596.21 [J/Kg. de biomasa]\*0.005[Kg. de biomasa /seg]

Pot. ter. biomasa = 80497.98 [W] = 80.49 [kW], entonces la eficiencia será:

$\eta$  Gasificador = (64.61[kW]/80.49 [kW])\*100 = 80.27 %

## **4.2. PRUEBAS HECHAS AL GAS POBRE PRODUCIDO.**

Con el objetivo de generar una noción del comportamiento del gasificador, se llevó a cabo una prueba de combustión del gas pobre para generar una diferencia de temperatura en el agua que fluye dentro de un intercambiador de calor sencillo de casco y tubo, prueba que se describe a continuación.

**4.2.1. PRUEBA DE COMBUSTIÓN DEL GAS POBRE PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DEL GASIFICADOR.** El proceso que se llevó a cabo se puede visualizar en la figura 40.

Figura 40. Prueba de combustión del gas pobre para generar una noción del comportamiento del gasificador.

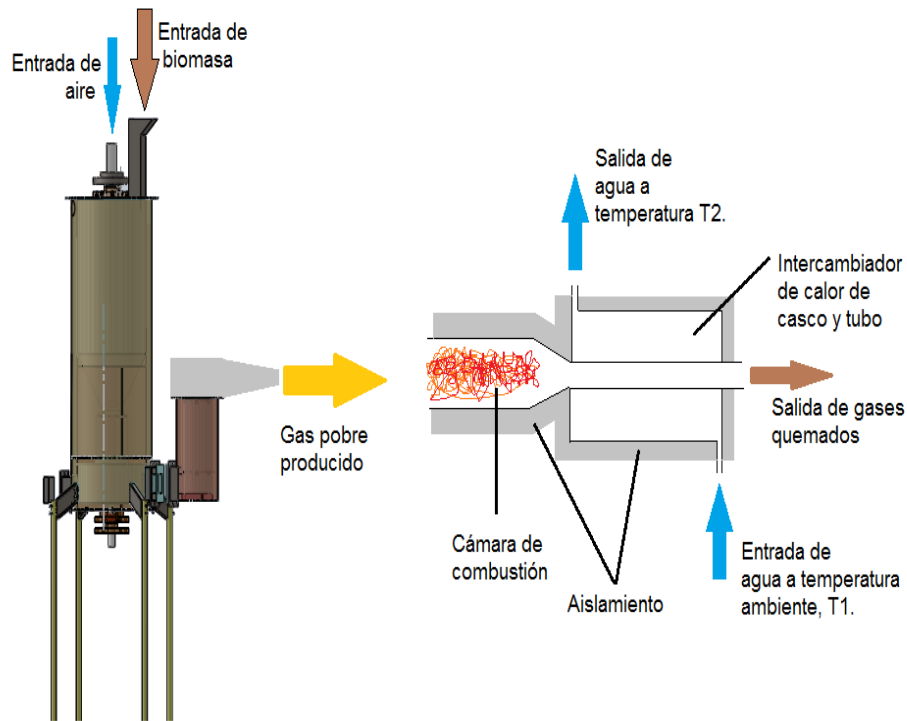
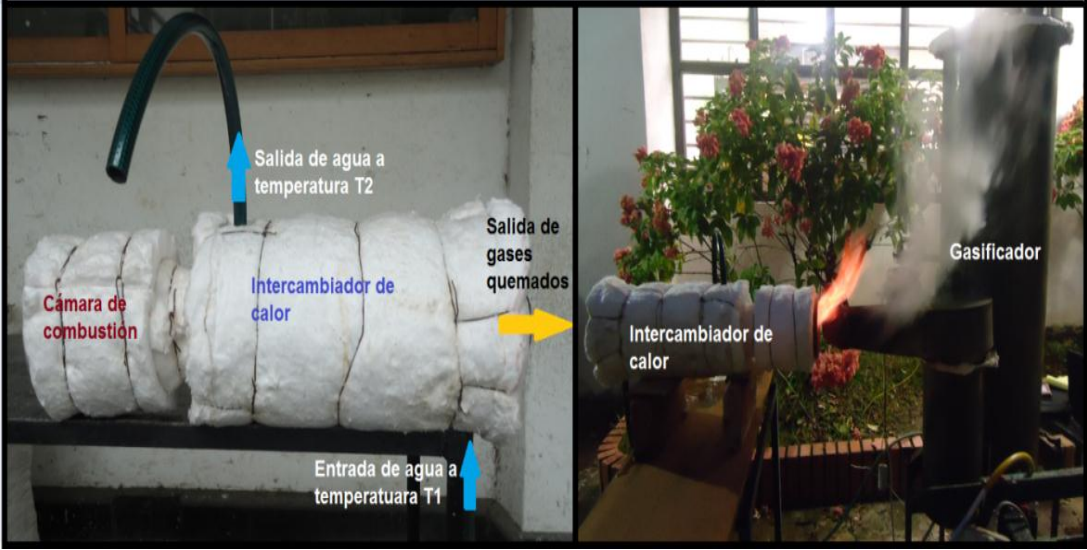


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

La corriente de gas pobre producida por el gasificador se quemó en una cámara de combustión cuyos gases calientes se hicieron pasar por un intercambiador sencillo de casco y tubo, dicho dispositivo se aisló muy bien (Ver figura 41) para evitar pérdidas de calor en el proceso de transferencia de calor hacia el agua que fluía por el intercambiador de calor, dicho caudal tenía un valor de 525 [cm<sup>3</sup>/minuto], en este proceso se monitorearon las temperaturas de entrada y salida del agua al intercambiador de calor, la duración de la prueba fue de 60 minutos y en dicho tiempo se introdujo una masa de 18 kilogramos de astillas de madera, en la figura 42 se puede ver el comportamiento del gasificador en el

tiempo gracias a la transferencia de calor que los gases pobres quemados aportan al agua del intercambiador de calor.

Figura 41. Prueba realizada al gas pobre producido por el gasificador.



Fotografía tomada en la Universidad Industrial de Santander.

Figura 42. Transferencia de calor de los gases de combustión al flujo de agua dentro del intercambiador de calor.

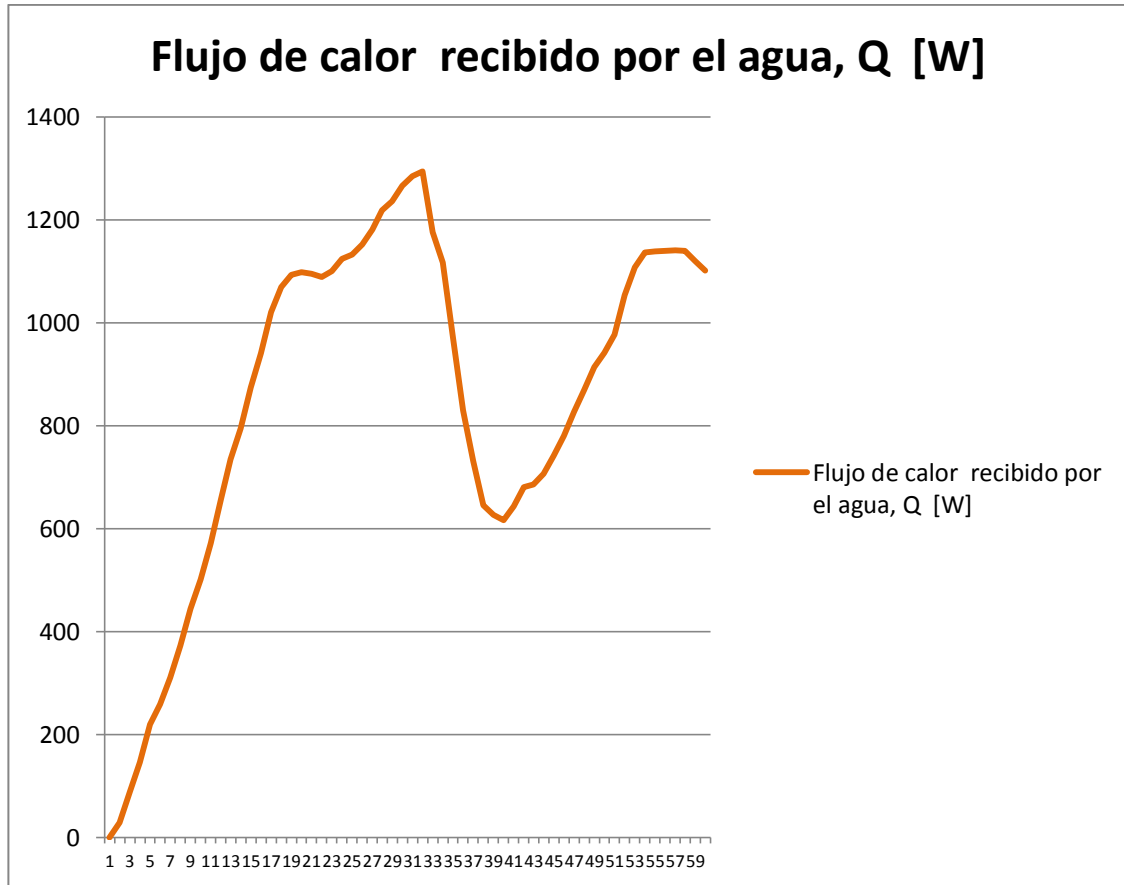


Figura realizada en el desarrollo de este proyecto de grado.

## 5. CONCLUSIONES

Se cumplió con los objetivos propuestos para el proyecto de grado, proporcionando una corriente de gas pobre a partir de los desechos orgánicos (astillas de madera), es decir, biocombustible, para ser usado en tres formas diferentes según las necesidades, esto es, aprovechamiento térmico (caso de este proyecto de grado), mecánico o eléctrico, dependiendo del nivel de conformación del grupo electrógeno donde el gasificador es quien suministra la energía química.

El tercer objetivo específico (Comprobar que el flujo de gas producido por el gasificador de biomasa residual forestal, genera una potencia térmica de aproximadamente 48 [KW], a través de la medición de la cantidad de vapor producido al quemar dicho gas en la caldera del laboratorio de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander) sobrepasa el marco general del Objetivo General planteado. Para poder ejecutar este objetivo como tal es necesario:

- Diseñar y construir un sistema de limpieza que garantice que la corriente de gas pobre no contiene alquitranes, de lo contrario se contaminará la caldera con los alquitranes y partículas que la corriente de gas pobre en bruto posee.
- Diseñar y construir un quemador especial para quemar la corriente de gas pobre previamente limpiada.

Los dos factores expuestos anteriormente impidieron que la forma usada para determinar la potencia térmica del gas fuera otra.

La dirección que se tomó para solucionar el tercer objetivo específico fue el planteamiento y ejecución del modelo termodinámico expuesto en el capítulo 4.

En el periodo de pruebas se determinó que el volumen de la cámara de reducción para el diseño planteado debía tener un volumen cero. El valor determinado mediante las normas fue de 16.5 centímetros.

La altura entre la entrada de aire y la garganta del gasificador se estableció en 15 centímetros contra 12.5 centímetros que establecen las normas.

El gasificador presenta aglutinamiento de biomasa en la zona de pirolisis, esto debido a que en dicha zona se producen alquitranes que hacen que la biomasa no fluya adecuadamente por la torre gasificadora. Entonces se hizo necesario movilizar la biomasa con una varilla para tratar de generar un flujo estable de biomasa.

Durante las pruebas se hizo evidente una falla de diseño y es el tamaño del cenicero, dicho volumen es muy pequeño y le da un rango de producción de gas combustible de aproximadamente treinta minutos para el tipo de biomasa utilizado (astillas de madera), tiempo en el que hay que extraer las cenizas para poder continuar con la producción de la corriente de gas pobre, dicho comportamiento del gasificador se puede observar en la figura 42.

La eficiencia hallada de 80.27% es la máxima que puede alcanzar el gasificador diseñado. Algunos factores que generan incertidumbre en el procedimiento utilizado para determinar dicha eficiencia son:

- La composición de los gases se tomó de la bibliografía.
- La entrega de energía térmica debido a la oxidación de la corriente de gas pobre es máxima debido a que se supone que dichos gases ingresan a la cámara de combustión a la temperatura de 25° C y a la presión de 1 Atm., se supone también que los gases quemados salen de la cámara de combustión a 25°C y a una atmosfera de presión.
- Se supuso que se lleva a cabo una combustión completa de los reactivos (corriente de gas pobre + aire), proceso evidentemente ideal.
- El caudal de aire usado para el proceso de gasificación se determinó bajo el siguiente criterio: El porcentaje de aire que se necesita para llevar a cabo el fenómeno fisicoquímico de la gasificación es únicamente el 30% del aire estequiométrico. El anterior criterio se extrajo de la bibliografía analizada.

## **RECOMENDACIONES**

### **A LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.**

Automatizar el gasificador para eliminar las fallas que el diseño planteado presenta.

### **AL DIRECTOR DE ESCUELA.**

Crear una línea de investigación en la Escuela de Ingeniería Mecánica cuya columna vertebral sean los procesos de transformación energética alternativos.

## BIBLIOGRAFÍA

Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. [1]

GASIFICACIÓN DE BIOMASA. Dr. Ing. PT René Lesme Jaén , UNIVERSIDAD DE ORIENTE. CUBA. [5]

<http://193.146.36.56/catedra/catedra/ asignaturas/Pirogas.pdf>. [4]

<http://educasitios2008.educ.ar/aula42/procesos-bioquimicos-de-la-biomasa/>. [6]

Tesis de grado (UIS) titulada: SISTEMA DE DOSIFICACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE COMO FUENTE DE ENERGÍA PARA UNA PLANTA DE DESTILACIÓN DE ACEITES ESENCIALES. [2]

Wood gas as engine fuel, FAO FORESTRY PAPER 72, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. [3]

# ANEXOS

## ANEXO A. IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL GASIFICADOR EN UN CORTE LONGITUDINAL DEL MISMO

